



Análise do Escoamento Atmosférico sobre Colinas Bidimensionais Paralelas

Tiago Fernando Fonseca Martins

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Álvaro Rodrigues

Coorientador: Eng.º José Carlos Matos

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Especialização em Energia Térmica**

Fevereiro de 2018

Resumo

O desenvolvimento tecnológico na área do aproveitamento eólico tem levado as *nacelle* a alturas cada vez maiores, com a área abrangida pelas pás a aumentar consideravelmente. Torna-se, assim, cada vez mais importante a caracterização do regime de ventos da zona a explorar, de forma a garantir que os esforços a que as turbinas estarão sujeitas não comprometerão a durabilidade e rentabilidade de um investimento eólico.

Na tentativa de traçar linhas guia atualizadas e relevantes para a tecnologia moderna de aproveitamento eólico, está a ser desenvolvido o Novo Atlas Europeu do Vento (*NEWA*). Uma das campanhas de medição que pretende ajudar na criação desse Atlas deu-se na Serra do Perdigão, Vila Velha de Rodão, Portugal. Por apresentar uma topografia bastante particular, duas colinas bidimensionais paralelas, é um local que traça a ponte entre um terreno plano e simples e um terreno de grande complexidade. Este tipo de terreno permitirá, assim, colocar à prova sistemas de medição remota e caracterizar o escoamento atmosférico entre duas colinas bidimensionais paralelas.

Para isso, foram analisados os dados de diversos aparelhos de medição remota instalados ao longo das colinas e do vale, bem como das torres de medição instaladas nos cumes. Depois de devidamente filtrados e limpos de quaisquer erros de medição, os dados permitiram calcular diversos parâmetros caracterizadores do regime de ventos que se verifica naquela zona. Esses dados permitiram, também, confrontar as medições realizadas por aparelhos LiDAR com aqueles medidos por Estações de Medição equipadas com anemómetros sónicos, e perceber qual a sensibilidade das medições do LiDAR a variáveis ambientais.

Os testes de sensibilidade do LiDAR montado no cume da colina Este, mostraram uma sobrestimação dos valores de velocidade em cerca de 8% e um erro na medição de direção. Percebeu-se, também, que estes desvios estão ligados a variáveis ambientais. Das variáveis estudadas, as que influenciam a leitura deste LiDAR são a temperatura, o gradiente de temperatura, rotação em altura, humidade relativa, *shear factor* e intensidade de turbulência. A utilização de apenas este tipo de dispositivos na caracterização de um escoamento em terreno moderadamente complexo ainda não é possível.

O escoamento atmosférico ao longo da linha não mostrou um comportamento fora daquele que seria espectável. No entanto, a campanha de medição que serviu de base para este trabalho, careceu da ocorrência mais assídua de ventos fortes. Os ventos fracos que se fizeram sentir tornaram difícil a análise da influência de fenómenos mecânicos nas propriedades do escoamento.

Abstract

Technological development in wind power has led to bigger and taller wind turbines, with the area covered by the blades increasing considerably. It is, therefore, becoming increasingly important to characterize the wind regime in the area to be explored, to ensure that the efforts to which the turbines will be subjected will not compromise the durability and profitability of a wind farm investment.

To draw current and relevant guide lines for modern wind energy technology, the New European Wind Atlas (NEWA) is being developed. One of the measurement campaigns that intends to help in the creation of this Atlas occurred at Serra do Perdigão, Vila Velha de Rodão, Portugal. It presents a very particular topography, two parallel two-dimensional hills, so it is a place that traces the bridge between a flat and simple terrain and a terrain of great complexity. This type of terrain will, thus, enable testing of remote measurement systems to the analysis of the atmospheric flow between two parallel two-dimensional hills.

For this, the data of several remote measuring devices installed along the hills and the valley, as well as of the measuring towers installed in the ridges, were analyzed. After properly filtered and cleaned of any measurement errors, the data allowed to calculate several parameters characterizing the regime of winds that occurs in that area. These data also allowed to compare the measurements performed by LiDAR devices with those measured by Measurement Stations equipped with sonic anemometers, and to understand the sensitivity of LiDAR measurements to environmental variables.

Sensitivity tests of the LiDAR mounted on the top of the Eastern hill, showed an overestimation of the values of speed in about 8% and an error in the measurement of direction. It was also noticed that these deviations are linked to environmental variables. The variables that influence the reading of this LiDAR are the temperature gradient, rotation in height, relative humidity, shear factor and turbulence intensity. The use of only such devices in the characterization of an atmospheric flow in a moderately complex ground is not yet possible.

The analysis of the atmospheric flow along the line of measurement equipment did not show a behavior outside what is considered normal. However, the measurement campaign that served as the basis for this work, lacked more assiduous occurrence of strong winds. The weak winds made it difficult to analyze the influence of mechanical phenomena on the flow properties.

Agradecimentos

A realização desta dissertação nunca teria sido possível sem o apoio de várias pessoas às quais deixo o meu agradecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Doutor Álvaro Rodrigues, pela ajuda e orientação prestada durante estes meses de trabalho. A disponibilidade demonstrada e a partilha de conhecimentos forma fundamentais na realização deste trabalho.

Ao Eng.º José Carlos Matos, pelo excelente trabalho de orientação, quer pela disponibilização dos dados que foram a base para este trabalho, quer por toda a ajuda dada e tempo disponibilizado ao longo desta dissertação.

Ao INEGI, em particular a todo o Setor de Energia Eólica, pelo espaço facultado, pelo ótimo ambiente de trabalho e por toda a hospitalidade demonstrada.

Ao Bruno Maia e à Joana Torres por toda a ajuda, por todo o encorajamento, por todas as brincadeiras e por ouvirem pacientemente os meus infundáveis discursos sobre tudo o que mais me revolta. À Catarina Gomes, pela eterna compreensão e por ser a prova de que a vida não tem de ser levada tão a sério. Ao Paulo Sousa, por todos os cafés, por todas as conversas sobre V8's, V10's e V12's, pelo companheirismo e por todas as palavras amigas. Vocês tornaram mais fácil este percurso.

À minha namorada, Inês, por ser um pilar na minha vida, um exemplo de força de vontade e resiliência. Por nunca me deixar desistir, por me fazer sorrir e por me fazer sonhar. Não teria conseguido sem ti, Inês.

Por fim, um obrigado à minha família. Aos meus pais, Angelina e Fernando, por todo o apoio e amor incondicional, por serem um exemplo de força e perseverança. Às minhas irmãs, Sandra e Tânia, por toda a ajuda e conselhos valiosos, e por terem ajudado a moldar-me no que sou hoje. Aos meus sobrinhos, Margarida e Rodrigo, pelos risos e palhaçadas, e por alegrarem qualquer dia.

Índice

1.	Introdução	1
1.1	Importância do Conhecimento do Regime de Ventos	1
1.2	Tecnologias de Medição Remota	3
1.3	Objetivos do Trabalho	4
1.4	Estrutura do Relatório	5
2.	Caraterização do Escoamento Atmosférico.....	7
3.	A Campanha de Medição da Serra do Perdigão	11
3.1	Topografia do Local	12
3.2	Distribuição dos Aparelhos de Medida	13
4.	Tecnologias Utilizadas	15
4.1	LiDAR Wind Profiler	15
4.2	Estações de Medição	19
4.3	Anemómetro de copos e cata-ventos	19
4.4	Anemómetros Ultrassónicos	20
5.	Processamento dos Dados da Campanha de Medição.....	23
5.1	Abertura dos ficheiros e criação de código	23
5.2	Filtragem dos dados	24
5.3	Informação contida nos dados	27
6.	Análise de Resultados.....	33
6.1	Windcube® versus Torre 29	33
6.2	LiDAR Zephir® (112)	42
6.3	Estação de Medição n.º 20	55
6.4	LiDAR Zephir® (111)	66
6.5	Estação de Medição 25.....	76
6.6	Estação de Medição 29 e Windcube®	87

7.	Análise simultânea – noção de campo.....	103
8.	Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros	109
8.1	Conclusões.....	109
8.2	Trabalhos futuros	111
9.	Referências	113

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação vetorial simplificada das forças atuantes na pá de um aerogerador	2
Figura 2 - Anemómetro de copos e cata-vento, sensor combinado.....	3
Figura 3 - Mapa das colinas bidimensionais paralelas com um corte transversal.....	12
Figura 4 - Disposição dos aparelhos de medida cujos dados serão estudados	14
Figura 5 - Funcionamento de um LiDAR com a técnica VAD	16
Figura 6 - Pontos de Medição pelo sistema VAD e respetiva curva de ajuste.....	17
Figura 7 – Vista de corte do local a estudar, através da linha imaginária que liga aproximadamente todos os aparelhos de medição utilizados	28
Figura 8 - Exemplo da representação de perfis de velocidade para diferentes direções de vento	29
Figura 9 - Exemplo da representação de valores de shear factor médios para diferentes direções de vento	30
Figura 10 - Exemplo da representação de ocorrências de diferentes direções de vento	30
Figura 11 - Exemplo da representação da intensidade de turbulência versus a velocidade horizontal média a uma altura definida	31
Figura 12 - Direção lida pelo Windcube versus direção lida pela Torre 29 @ 100m a.n.s.....	35
Figura 13 - Velocidade lida pelo Windcube versus velocidade lida pela Torre 29 @100m sem filtragem relativa ao efeito de esteira	36
Figura 14 - Razão entre as velocidades @ 100m lidas pela torre e a velocidade lida pelo LiDAR versus a direção lida pela Torre 29 @ 100m	37
Figura 15 - Posição relativa entre a Estação de Medição nº29 e o Windcube®	37
Figura 16 - Zoom para ocorrências entre os 150 e os 250°	38
Figura 17 - Velocidade lida pelo Windcube versus velocidade lida pela Torre 29 @100m c/ filtragem relativa ao efeito de esteira.....	39
Figura 18 - Corte Norte-Sul Zephir 112	42
Figura 19 – Inclinação do escoamento a 20 metros versus a direção do vento a 20 metros (Zephir 112)	43

Figura 20 - Perfil de Velocidade Médio Zephir 112	44
Figura 21 - Perfis de velocidade média para diferentes direções medidas @ 100 metros a.n.s.	45
Figura 22 - Ocorrências a 100 metros a.n.s. registadas pelo Zephir 112	46
Figura 23 - Shear factor entre 20 e 200 metros a.n.s. em função da direção, Zephir 112.....	47
Figura 24 - Ocorrências em função da direção @ 100 metros a.n.s. (período diurno vs noturno)	48
Figura 25 - Perfis de velocidade médios em função da direção @ 100 metros a.n.s. (período diurno - Zephir 112).....	48
Figura 26 - Perfis verticais médios em função da direção @ 100 metros a.n.s. [Lado esquerdo - período diurno; Lado direito - período noturno]	49
Figura 27 - Perfil de Velocidade Médio Zephir 112 para os períodos diurno e noturno	50
Figura 28 - Shear factor entre 20 e 100 metros a.n.s. em função da direção para os períodos diurno e noturno, Zephir 112.....	51
Figura 29 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros)	52
Figura 30 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros) s/ velocidades menores que 3 m/s	53
Figura 31 - Intensidade de Turbulência vs Velocidade Horizontal média a 20 metros a.n.s.	54
Figura 32 - Intensidade de Turbulência vs Velocidade Horizontal média a 19 metros a.n.s. (velocidades superiores a 3 m/s)	55
Figura 33 - Corte Norte-Sul Torre 20.....	56
Figura 34 - Ocorrências a 100 metros a.n.s. registadas pela Torre 20	56
Figura 35 - Inclinação do escoamento a 10 metros a.n.s. versus direção do escoamento a 10 metros a.n.s. (Torre 20).....	57
Figura 36 - Inclinação do escoamento a 100 metros a.n.s. versus direção do escoamento a 100 metros a.n.s. (Torre 20).....	58
Figura 37 - Perfil de velocidade médio da Torre 20.....	58

Figura 38 - Perfis de velocidade médios para as principais direções medidas @ 100 metros a.n.s. (Torre 20)	59
Figura 39 - Shear factor 10/100 versus direção a 100 metros a.n.s. – Torre 20.....	60
Figura 40 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros)	61
Figura 41 - Diferença de direção entre os 10 e os 100 metros a.n.s. em função da direção a 100 metros a.n.s.....	62
Figura 42 - Ocorrências a 100 metros durante o período diurno e noturno	64
Figura 43 - Shear factor entre 10 e 100 metros a.n.s. em função da direção para os períodos diurno e noturno, Torre 20.....	64
Figura 44 - Diferença entre a direção do escoamento a 10 e a 100 metros a.n.s. em função da direção @ 100 metros a.n.s. (Torre 20)	65
Figura 45 - Intensidade de turbulência @ 100 metros a.n.s. (Período diurno versus período noturno)	65
Figura 46 - Corte Norte-Sul (Zephir 111)	66
Figura 47 - Ocorrências a 100 metros a.n.s. registradas pelo Zephir 111	67
Figura 48 - Inclinação do escoamento a 20 metros versus a direção do vento a 20 metros (Zephir 111)	67
Figura 49 - Perfil médio de velocidades - Zephir 111	68
Figura 50 - Perfis de velocidade médios para as principais direções medidas @ 100 metros a.n.s. (Zephir 111).....	69
Figura 51 - Shear Factor 20/200 versus direção (Zephir 111).....	70
Figura 52 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros, Zephir 111).....	71
Figura 53 - Rotação entre os 100 e os 20 metros a.n.s. em função da direção a 100 metros a.n.s. (Zephir 111).....	71
Figura 54 - Intensidade de Turbulência versus Velocidade Horizontal @ 20 metros a.n.s.	72

Figura 55 - Ocorrências @ 100 metros a.n.s. (Período diurno e noturno - Zephir 111)	73
Figura 56 - Perfil de velocidades médio e independente da direção - Diurno vs Noturno (Zephir 111)	74
Figura 57 - Shear factor 20/200 em função da direção do escoamento @ 100 metros a.n.s. (diurno vs noturno)	75
Figura 58 - Diferença entre a direção do escoamento a 10 e a 100 metros a.n.s. em função da direção @ 100 metros a.n.s. (Zephir 111).....	76
Figura 59 - Corte Norte-Sul (Torre 25)	77
Figura 60 - Número de ocorrências para as diferentes direções @ 100 metros a.n.s. (Torre 25)	78
Figura 61 - Perfil de velocidades médio, medido pela Torre 25	79
Figura 62 - Perfis de velocidade médios para as principais direções medidas @ 100 metros a.n.s. (Torre 25)	80
Figura 63 - Corte Noroeste-Sudeste (Torre 25).....	81
Figura 64 - Shear Factor 10/100 (Torre 25)	81
Figura 65 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros, Torre 25).....	82
Figura 66 - Número de ocorrências para as diferentes direções @ 10 metros a.n.s (Torre 25)	83
Figura 67 - Inclinação do escoamento em função da direção @ 10 metros a.n.s (Torre 25)	83
Figura 68 - Ocorrências em função da direção @ 100 metros a.n.s – Diurno vs Noturno (Torre 25).....	84
Figura 69 - Perfil de velocidades médio e independente da direção - Diurno vs Noturno (Torre 25).....	85
Figura 70 - Shear Factor em função da direção do vento @ 100 metros a.n.s. (Período Diurno vs Período Noturno)´	86
Figura 71 - Rotação do escoamento entre os 10 e os 100 metros a.n.s. (direção de referência @ 100 metros a.n.s.) - período Diurno vs Noturno (Torre 25)	87
Figura 72 - Corte paralelo à cumeeada (NW - SE) - Torre 29 e Windcube®	88
Figura 73 - Ocorrências a 100 metros a.n.s. (Torre 29)	89
Figura 74 - Inclinação do escoamento em função da direção @ 10 metros a.n.s. (Torre 29)	90

Figura 75 - Corte ENE - WSW da colina Este	91
Figura 76 - Inclinação do escoamento em função da direção @ 10 metros a.n.s., para velocidades superiores a 2 m/s (Torre 29)	91
Figura 77 - Perfil de velocidades médio e independente da direção (Torre 29).....	92
Figura 78 - Perfil de velocidades médio e independente da direção (Windcube®)	93
Figura 79 - Perfis de velocidade médios para as principais direções medidas @ 100 metros a.n.s. (Torre 29)	94
Figura 80 - Shear factor em função da direção @ 100 metros a.n.s. (Torre 29)	95
Figura 81 - Rotação em altura em função da direção a 100 metros a.n.s. (Torre 29)	95
Figura 82 - Rotação entre os 10 e os 100 metros a.n.s. em função da direção a 100 metros a.n.s.	96
Figura 83 - Intensidade de Turbulência em função da velocidade horizontal (@ 10 metros a.n.s.) - Torre 29	97
Figura 84 - Ocorrências em função da direção (@ 100 metros a.n.s.) - período diurno e noturno	97
Figura 85 - Perfil de velocidades médio e independente da direção - Diurno vs Noturno (Torre 29).....	98
Figura 86 - Perfis de velocidade média em função da direção @ 100 metros a.n.s. (à esquerda: Período diurno; à direita: Período noturno) - Torre 29	99
Figura 87 - Shear factor diurno e noturno em função da direção @ 100 metros a.n.s. - Torre 29...	100
Figura 88 - Diferença entre a altura a 100 e a 10 metros a.n.s. em função da direção a 100 metros a.n.s.	101
Figura 89 - Intensidade de turbulência função da direção @ 60 metros a.n.s. (Torre 29)	101
Figura 90 - Perfis de velocidade dos diferentes dispositivos de medição (Canto superior esquerdo - p/ velocidade máxima; Canto inferior esquerdo - p/ velocidade mínima; Canto superior direito - p/ temperatura máxima; Canto inferior direito - p/ temperatura mínima).....	105
Figura 91 - Direção do vento nos diferentes dispositivos de medição (Canto superior direito - p/ velocidade máxima; Canto inferior esquerdo - p/ velocidade mínima; Canto superior direito - p/ temperatura máxima; Canto inferior direito - p/ temperatura mínima).....	107

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Aparelhos de medição utilizados.....	13
Tabela 2 - Sensibilidade das medições a variáveis ambientais	41
Tabela 3 - Velocidade Média às diferentes alturas lidas pelo Zephir 112.....	44
Tabela 4 - Velocidade Média às diferentes alturas lidas pelo Zephir 112 durante o dia e a noite	50
Tabela 5 - Temperaturas médias diurnas e noturnas medidas pela Torre 20	63
Tabela 6 - Valores e Datas dos pontos máximos e mínimos de Velocidade e Temperatura @ 100 metros a.n.s.....	104

Nomenclatura

L – Força de sustentação

D – Força de arrasto

M – Momento

C_L – Coeficiente de sustentação

C_D – Coeficiente de arrasto

C_M – Coeficiente de momento

ρ – Massa volúmica

c – Comprimento da corda

V_∞ - Velocidade não afetada pela presença das pás

u – Velocidade horizontal

u_{ref} – Velocidade horizontal à altura de referência

z – Altura

z_{ref} – Altura de referência

α – *Shear factor*

z₁ – Altura inferior para a medição do *shear factor*

z₂ – Altura superior para a medição do *shear factor*

σ – Desvio padrão

1. Introdução

As exigências energéticas de uma sociedade tecnologicamente desenvolvida e a simultânea necessidade de proteger o meio ambiente que nos rodeia, continuam a colocar um problema considerável aos engenheiros da atualidade. A procura de energia limpa em quantidades capazes de saciar a necessidade energética atual e das gerações futuras, tem fomentado o desenvolvimento da tecnologia de aproveitamento de energias de fonte renovável. As chamadas “Energia Renováveis”, em particular as que contribuem para o *mix* energético do setor elétrico, são já uma contribuição assinalável para a solução do problema, mas são ainda vários os desafios a vencer para consolidar essa posição, e torná-las competitivas com as fontes de natureza fóssil que deverão substituir progressivamente.

1.1 Importância do Conhecimento do Regime de Ventos

No caso da energia contida no vento, a tendência atual é a de utilizar aerogeradores de cada vez maior dimensão, afastando o rotor do solo e aumentando a envergadura das pás. Esta tentativa de “conquistar os céus” uma vez mais, leva a que seja imperativo um conhecimento profundo das características do vento numa determinada zona onde se pretenda montar um parque eólico, dada a magnitude dos esforços sentidos em toda a estrutura quando o ponto mais alto e o ponto mais baixo da parte móvel de uma turbina estão distanciados por mais de uma centena de metros.

Uma turbina eólica anima as pás com movimento de rotação através da conversão a energia cinética do vento. Num gerador elétrico, este movimento de rotação é depois convertido em energia elétrica. De maneira a otimizar o aproveitamento eólico, as pás de uma turbina devem ser desenhadas e desenvolvidas de forma a que as forças responsáveis pelo movimento de rotação não sejam as forças de arrasto, mas sim as de sustentação. As pás são longas e esguias e, idealmente, a componente do vento perpendicular à corda da pá deverá ser bastante reduzida, podendo ser desprezada. É, assim, possível estudar o desempenho aerodinâmico de uma pá como se de um fenómeno bidimensional se tratasse [1].

Idealmente, a forma alar da pá da turbina levaria a que fosse apenas verificada uma componente de sustentação, no entanto, esta componente pode ser maximizada, mas não é possível isolá-la completamente, pelo que estará sempre acompanhada de uma componente de arrasto.

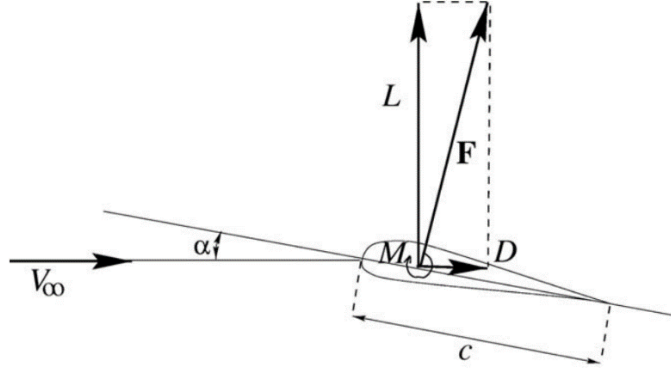


Figura 1 - Representação vetorial simplificada das forças atuantes na pá de um aerogerador

As componentes de sustentação, de arrasto e o momento gerado podem ser calculados através das seguintes expressões:

$$L = \frac{1}{2} C_l \rho V_\infty^2 c \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 c \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{2} C_M \rho V_\infty^2 c^2 \quad (3)$$

Onde C_l , C_D e C_M são, respetivamente, os coeficientes de sustentação, arrasto e momento, ρ é a massa volúmica do ar, V_∞ é a velocidade do vento antes de ser afetado pela presença da pá e c é o comprimento da corda.

Todas estas forças atuantes na pá dependem do quadrado da velocidade. Assim, as forças a que a estrutura está sujeita serão bastante sensíveis a variações na velocidade, quer da sua intensidade, quer da sua direção, variações essas que introduzirão esforços potencialmente severos em toda a estrutura. Apesar de existirem sistemas com o objetivo de atenuar efeitos perversos causados por rotações e variações de intensidade do vento em altura, e assim protegerem a estrutura, a importância de classificar um local não só pela intensidade do vento, mas também pela sua qualidade continua a ser uma realidade. Isto torna-se ainda mais evidente quando se tem em conta que a potência transmitida à turbina é função do cubo da velocidade do vento. Uma má estimativa das propriedades deste recurso poderá levar a uma subestimação da produção elétrica de um investimento ou, e talvez com consequências piores, a uma sobrestimação da produção elétrica de um parque. Conhecer as características do regime de vento de um determinado local

é a melhor forma de reduzir ao máximo o risco de um investimento eólico e de avaliar corretamente qual poderá ser o retorno de investimento esperado.

É, assim, necessário conhecer e prever corretamente as características do vento em altura, de forma a cobrir toda a área varrida pelas pás, e a forma como os perfis de velocidade e as rosas do vento são influenciadas pela topografia do local, entre outros fatores.

1.2 Tecnologias de Medição Remota

A construção de parques eólicos para conversão da energia do vento em energia elétrica foi suportada desde muito cedo pelos dados obtidos em estações de medição, capazes de medir a velocidade do vento com anemômetros de copos e a direção do vento com cata-ventos, normalmente instalados a duas ou três alturas do solo.



Figura 2 - Anemômetro de copos e cata-vento, sensor combinado

No entanto, o aumento da altura das turbinas eólicas levou a que, para se extrapolar valores suficientemente próximos dos reais, também as torres de medição tivessem de tornar-se mais altas. Empiricamente, a indústria da Energia Eólica tem seguido a regra de que as medições devem ser efetuadas a, pelo menos, $2/3$ da altura do eixo do rotor. Contudo, é cada vez mais evidente a importância do conhecimento das características do vento a alturas superiores. Isto leva a campanhas de medição mais caras e complexas, com torres de medição que, mesmo assim, não conseguem medir os ventos da área varrida pelas pás da turbina sem recurso a uma extrapolação. Esta extrapolação assume, por sua vez, que o perfil de velocidades se mantém para maiores distâncias ao solo, o que nem sempre reflete a realidade de um local. A complexidade do terreno e a cobertura do solo, entre outros fatores, podem introduzir grandes variações nas características do vento a diferentes alturas. Tornou-se, assim, necessária a procura de tecnologias capazes de medir de forma confiável a velocidade do vento e outras propriedades do

escoamento a alturas superiores às das mais altas torres, com custos de montagem e manutenção competitivos.

Essa tecnologia foi encontrada sob a forma de sistemas SODAR e LiDAR, que determinam a velocidade e direção do vento, utilizando som e luz, respetivamente. Ambas as técnicas têm como princípio de funcionamento o efeito de Doppler, com o LiDAR a detetar a frequência das ondas eletromagnéticas refletidas por partículas existentes no ar, e o SODAR a detetar a frequência de ondas de som refletidas pela variação da estrutura térmica da atmosfera [2].

Como dito anteriormente, estes métodos permitem medir o perfil de ventos a alturas superiores às do ponto máximo atingido pelas pás das turbinas (200 metros, atualmente), relevantes para o aproveitamento eólico, mas fora do alcance de torres de medição com alturas sensatas. Esta não é, porém, a única utilidade encontrada para esta tecnologia. A montagem de aparelhos LiDAR ou SODAR nas *nacelle* das turbinas eólicas, ainda que uma aplicação que de momento não é utilizada em termos industriais, possibilitará a medição das características do vento que se aproxima da turbina. Esta informação permitirá a alteração de alguns parâmetros da máquina (orientação da *nacelle*, ângulo de ataque das pás, entre outros), de forma a maximizar o aproveitamento eólico e proteger a turbina de ventos que a poderão danificar.

No entanto, pela sua natureza, estes aparelhos medem a velocidade do vento num volume muito maior do que um anemómetro de copos montado numa torre de medição, por exemplo. Isto leva a que medições efetuadas em locais onde o regime de vento varia muito (zonas de relevo complexo, por exemplo), os dados obtidos por aparelhos de medição remota se careçam ainda de validação para que possam ser usados corretamente. Por essa razão, o financiamento de um projeto de aproveitamento eólico e a verificação da curva de potência das turbinas ainda estão dependentes de medições de anemómetros montados em torres estrategicamente erguidas ao longo do terreno a explorar.[2]

A validação dos dados dos aparelhos de medição remota deve ser procurada, tanto pelo desenvolvimento da tecnologia utilizada, como pela elaboração de mais estudos em terrenos de topografia complexa.

1.3 Objetivos do Trabalho

Este trabalho teve como objetivo principal a caracterização do regime de vento numa zona de terreno moderadamente complexo, utilizando para isso os dados obtidos por aparelhos de medição remota e torres de medição equipadas com anemómetros ultrassónicos (comummente chamados de anemómetros sónicos).

O processamento dos dados foi feito com recurso à linguagem *Python*, e todo o código foi estruturado e apresentado em ficheiros *Jupyter Notebooks*.

Não constituindo o objetivo principal pretendeu-se, ainda, perceber de que forma este tipo de topografia e cobertura de solo afetam as medições dos aparelhos de medição remota, bem como criar linhas guia para o processamento dos dados obtidos por este tipo de tecnologias, sobre a forma de código bem estrutura e documentado.

1.4 Estrutura do Relatório

No capítulo 2 serão abordados os parâmetros a utilizar na caracterização do escoamento atmosférico. Será discutida a sua importância na indústria da Energia Eólica e a influência que têm no desempenho dos aerogeradores.

No capítulo 3 discutir-se-á a campanha de medição que está na base deste trabalho. Será também abordada a topografia do local e a forma como os dispositivos de medição estão distribuídos pelo terreno.

No capítulo 4, serão discutidas as tecnologias que foram utilizadas para recolher os dados utilizados, qual o princípio de funcionamento desses dispositivos de medição e de que forma as suas características são tidas como prós ou contras na sua aplicação na indústria do vento.

O capítulo 5 descreve o procedimento tomado no processamento de dados. Discute-se a forma encontrada para a abertura dos ficheiros e processamento dos dados, bem como a filtragem que foi aplicada aos dados recolhidos, de forma a eliminar erros de medição.

O capítulo 6 procura, numa fase inicial, validar os dados do LiDAR colocado na colina Este à luz da norma IEC 61400 e utilizando os dados recolhidos na estação de medição n.º 29 como medidor de referência. Seguiu-se uma análise do escoamento nos locais onde foram instalados os dispositivos de medição, procurando assim caracterizar-se o escoamento quanto aos parâmetros descritos no capítulo 2.

No capítulo 7 garantiu-se a concorrência temporal das medições e procuraram-se, de seguida, os pontos associados a medições de velocidade e temperatura máxima e mínima. Procurou-se, assim, não só perceber de que forma estes dois parâmetros influenciam o escoamento, mas também ter uma ideia de campo do escoamento e das suas características.

No capítulo 8 são debatidas as conclusões gerais da presente dissertação, assim como traçadas as perspetivas para trabalhos futuros.

Remetidos para anexo encontram-se os cortes no terreno que permitem perceber a topografia junto aos dispositivos utilizados. Também em anexo estão todos os gráficos utilizados na comparação entre as medições na estação de medição n.º 29 e no Windcube®. Os perfis de velocidade média para os períodos diurno e noturno, bem como os gráficos de inclinação do escoamento em função da direção para as alturas de medição, também foram remetidos para os anexos.

2. Caraterização do Escoamento Atmosférico

A necessidade de compreender o escoamento atmosférico num determinado local, leva a que sejam utilizados parâmetros-chave que permitam caraterizar o vento a partir de parâmetros mensuráveis pelas torres de medição e/ou pelos sistemas de medição remota. Estão, entre os mais utilizados, o *wind veer*, *wind shear* e a intensidade de turbulência, todos eles com uma grande importância no apuramento das condições de operação dos aerogeradores e, consequentemente, nos custos de manutenção e capacidade de produção das turbinas.

O *wind shear* traduz a variação da velocidade em altura. O atrito viscoso entre o solo e o ar, potenciado pela vegetação e outras irregularidades, leva a que a baixas alturas a velocidade do vento seja menor do que a velocidade a alturas mais elevadas, dado que o efeito da viscosidade vai sendo menos determinante na velocidade das camadas mais altas do vento. Assim, a velocidade a uma altura z pode ser escrita como:

$$u(z) = u_{ref} (z/z_{ref})^\alpha \quad (4)$$

onde u_{ref} é a velocidade do vento à altura de referência z_{ref} , e α é o chamado *shear factor*. Esta não é a única forma de se aproximar um perfil de velocidades através de uma expressão matemática, mas é a expressão mais utilizada na indústria do vento. O *shear factor* (α) representa o perfil de velocidade de vento com base numa razão de velocidades. Este parâmetro é aceite em diversas aplicações de engenharia, com α calculado a partir de medições de velocidade a duas alturas distintas:

$$\alpha = \log(u_{z_2}/u_{z_1})/\log(z_2/z_1) \quad (5)$$

onde u_{z_2} e u_{z_1} são, respetivamente, as velocidades às alturas z_2 e z_1 [12]. Estas alturas devem ser escolhidas de forma a que sejam o mais afastadas possível. Isto produz o valor de *shear factor* e o consequente perfil de velocidade mais perto do perfil real. No entanto, a utilização de um z_1 demasiado pequeno pode constituir um problema, caso a velocidade a essa altura seja ainda muito influenciada pela vegetação e obstáculos que possam existir. A expressão de cálculo do *shear factor* não conta explicitamente com o valor da rugosidade do terreno, nem faz referência à sua cobertura porque, como são utilizados dois pontos no mesmo local para calcular o *shear factor*, o efeito destes fatores está presente no afastamento ou aproximação dos valores das velocidades medidas a duas alturas diferentes. Contudo, se a menor altura de medição for demasiado próxima do solo, poderão ser introduzidos efeitos

que afetam a velocidade perto do solo, mas que não afetam a velocidade a outras alturas. Isto altera o *shear factor* e afasta-o da realidade.

Quando existem três alturas de medição possíveis, os três valores de *shear factor* possíveis de calcular raramente coincidem, ou seja, o perfil de evolui e α não é constante com o afastamento ao solo. Porém, com a escolha correta de α , este método provou-se fiável e capaz de criar perfis com um bom ajuste aos perfis reais [12]. Será de esperar que o valor de α aumente com o aumento da rugosidade do terreno (maior atrito entre o vento e a superfície diminui a velocidade do escoamento junto ao solo, e aumenta assim o gradiente de velocidades), e que diminua com o aumento positivo do gradiente geométrico do terreno (o fluido é obrigado a acelerar nas alturas mais baixas para conseguir acompanhar o escoamento em altura, levando a uma maior uniformidade do perfil de velocidades). Por vezes, o efeito da topografia na velocidade do escoamento pode ser de tal maneira significativo que, junto ao solo, a velocidade torna-se superior à velocidade medida a alturas superiores, e o *shear factor* assume valores inferiores a zero.

A variação da velocidade do vento com o afastamento ao solo é de elevada importância na indústria da Energia Eólica. A diferença de velocidade de vento a diferentes distâncias do eixo do rotor, introduzem esforços que podem colocar em causa a durabilidade e eficiência de um aerogerador. Assim, o *shear factor* permite uma rápida compreensão do tipo de perfis espectáveis num local, e a qualificação desses locais quanto à dificuldade de operação dos aerogeradores e durabilidade das máquinas durante o seu funcionamento. A maior parte dos aerogeradores são desenvolvidos para operarem em ambientes com valores de *shear factor* a variarem entre 0 e 0,20. Locais com valores que saiam deste intervalo poderão também ser utilizados para o aproveitamento eólico, mas uma garantia de funcionamento deve ser dada pelo fabricante.

O *wind veer* procura descrever a variação da direção do escoamento ao longo do perfil de velocidades. Aparelhos como os LiDAR e anemómetros ultrassónicos utilizados conseguem medir a direção do vento, pelo que a medição da rotação do escoamento em altura pode ser feita com qualquer uma destas tecnologias. Da mesma forma que a diferença de velocidade a diferentes alturas pode introduzir esforços significativos no aerogerador e seus componentes, também a variação da direção do vento pode ter efeitos perversos nas máquinas. As pás dos aerogeradores estão desenhadas para aproveitarem a energia do vento que sopra paralelo ao eixo de rotação do rotor. Desvios desta direção colocam em causa a força de sustentação que promove o movimento de rotação do rotor, pelo que mesmo pequenos desvios ao longo da área abrangida pelas pás introduzem um desequilíbrio de forças que, mais uma vez, pode pôr em causa

o bom funcionamento de um aerogerador. O valor máximo recomendado para a diferença entre a direção nos pontos máximo e mínimo abrangido pelo rotor é de 10°.

A turbulência pode ser descrita como a flutuação do vetor velocidade de um escoamento de ar. Um escoamento com poucas variações estará associado a uma pequena turbulência e um escoamento com muitas variações estará associado a uma grande turbulência. No entanto, termos como “pouco” e “muito” são subjetivos e insuficientes na classificação da turbulência espectável num local. Na indústria da Energia Eólica foi, por isso, criada uma escala que permite relativizar a turbulência, conhecida como Intensidade de Turbulência (I.T.), calculada por:

$$I.T. = \sigma/U \quad (6)$$

Onde σ é o desvio-padrão da velocidade horizontal num determinado ponto ao longo de um determinado período de tempo, e U é a velocidade horizontal média nesse mesmo ponto ao longo do mesmo período de tempo [13], normalmente dez minutos. Esta é apenas uma das formas de medir e caracterizar a turbulência, dado que somente se consideram flutuações longitudinais da velocidade, mas é a forma mais relevante para aplicações na área de produção de energia a partir do vento. Pela natureza dos dispositivos de medição utilizados, o valor de intensidade de turbulência calculado, apesar de relevante na comparação do estado do escoamento a diferentes alturas e em diferentes pontos do terreno, não poderá ser comparado com as tradicionais medições e valores calculados a partir de dados de anemómetros de copos.

A escala de intensidade de turbulência é representada percentualmente. Um escoamento idealizado, onde não existissem variações no vetor velocidade ao longo do tempo, teria uma intensidade de turbulência de 0%. Não é, no entanto, pela complexidade de um escoamento atmosférico, possível encontrar uma intensidade de turbulência tão reduzida. É, porém, possível obter uma intensidade de turbulência superior a 100%, dada a fórmula de cálculo deste parâmetro. Isto acontece quando existem grandes flutuações no escoamento para velocidades médias baixas [13], com pouco interesse para a maior parte de aplicações.

A utilização destes parâmetros permite, por serem aceites e vastamente adotados no estudo do vento, uma caracterização do escoamento atmosférico num certo local e a comparação de escoamentos em diferentes locais com diferentes características topográficas e meteorológicas. Serão, por isso, estes os parâmetros utilizados neste trabalho, complementados com outros, pertinentes para a compreensão de fenómenos particulares.

3. A Campanha de Medição da Serra do Perdigão

Os dados que serviram de base para este trabalho foram recolhidos no âmbito de uma campanha de medição na Serra do Perdigão, Vila Velha de Rodão, Portugal. Essa campanha de medição tinha como objetivo primário a recolha de informação relevante para o Novo Atlas Europeu do Vento.

A ideia de criar um mapa de ventos internacional, aliado a um conjunto de linhas guia para a exploração da energia contida no vento, não é nova. Aliás, o “Novo” em “Novo Atlas Europeu do Vento” remete para a existência de um outro, anterior a este.

Na tentativa de promover o mercado europeu de produção de energia elétrica a partir da energia eólica e, consequentemente, fomentar o desenvolvimento de tecnologias e sistemas associados a este aproveitamento energético, foi criado em 1989 um Atlas Europeu do Vento.[3]

Dr. W. Palz escreveu relativamente ao Atlas Europeu do Vento (1989), *“I trust that all those interested in the future development of wind energy utilization in Europe will appreciate this vast work and benefit from the comprehensive information it provides in their future activities.”*[3].

A informação contida nesse Atlas, complementou e simplificou o conteúdo de atlas de vento nacionais e criou um plano geral dos regimes de vento, metodologias, procedimentos e recomendações a todos aqueles interessados na produção de energia elétrica a partir do vento em toda a Comunidade Europeia, incluindo zonas de terreno complexo. Estas metodologias e procedimentos, em conjunto com um programa de computador que permite a sua aplicação prática, foram a base do desenvolvimento da indústria de Energia Eólica tal como hoje a conhecemos. [3]

Durante muitos anos, a utilidade de um Atlas com as características de vento de todos os países da Comunidade Europeia verificou-se vezes e vezes sem conta e o investimento em aproveitamentos eólicos e desenvolvimento de tecnologias para esses projetos aumentou substancialmente desde os finais da década de 80. No entanto, os dados retirados deste Atlas têm-se mostrado desatualizados e pouco relevantes no estado atual da indústria. O desenvolvimento tecnológico que estimularam levou ao aparecimento de estruturas maiores, dotadas de pás com grandes envergaduras quando comparadas com as máquinas comercializadas há algumas décadas. Com a capacidade de levar a *nacelle* a 200 metros acima do nível do solo e a envergadura do rotor a atingir 300 metros, tornou-se importante conhecer o regime de ventos até alturas mais significativas para a tecnologia contemporânea e dos anos que se avizinham. Assim, no mesmo espírito de disponibilizar informação importante para o aproveitamento eólico por toda a Europa, mas agora a alturas mais relevantes para as turbinas modernas, nasce o Novo

Atlas Europeu do Vento. O NEWA pretende fornecer linhas guia para a construção, exploração e estudo da energia eólica.

Uma das campanhas de medição deste projeto decorreu na Serra do Perdigão, em Vila Velha de Ródão.

3.1 Topografia do Local

A escolha do local foi suportada por uma topografia que pode ser considerada um “meio-termo” entre um local de topografia simples e um lugar de topografia complexa. Esta característica permite não só recolher dados de vento daquela zona, bem como aperfeiçoar técnicas de medição e ajudar a desenvolver e validar novas tecnologias de caracterização do escoamento atmosférico.

A campanha de medição que recolheu os dados relevantes para o tema em estudo (e muitos mais), decorreu numa zona composta por duas colinas que podem ser consideradas praticamente bidimensionais e estão dispostas paralelamente entre si.

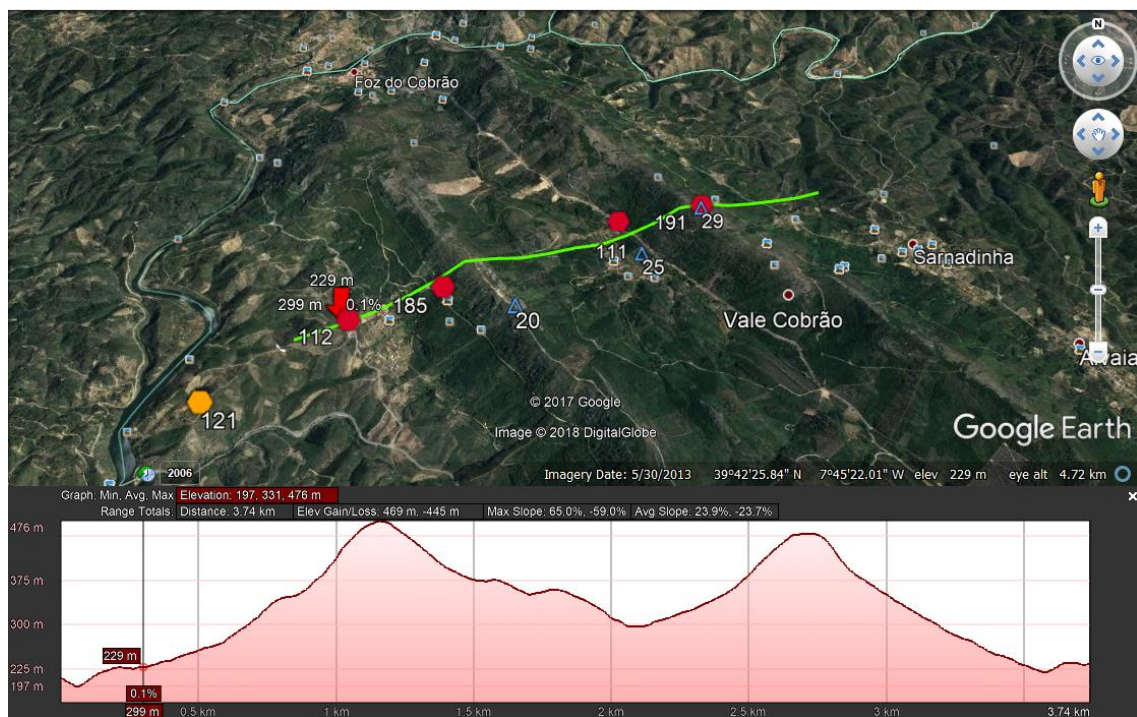


Figura 3 - Mapa das colinas bidimensionais paralelas com um corte transversal

A base das colinas está a cerca de 200 metros de altitude, com os topos a atingirem uma altura de cerca de 250 metros relativamente ao terreno envolvente.

3.2 Distribuição dos Aparelhos de Medida

Foram colocados aparelhos de medição desde o sopé das colinas até ao seu cimo, bem como ao longo de todo o vale. No entanto, no âmbito deste trabalho serão apenas utilizados os dados de alguns aparelhos chave, que permitam a leitura de informação relevante na caracterização do regime de ventos daquela zona. Será, assim, possível confirmar ou refutar hipóteses tiradas à luz dos conhecimentos de escoamentos atmosféricos e da mecânica dos fluidos (zonas de aceleração, zonas de desaceleração, zonas de recirculação, ...). Os dados a tratar foram recolhidos pelos seguintes aparelhos:

Tabela 1 - Aparelhos de medição utilizados

Número	Tecnologia	Nome Comercial	Instituição / Empresa
112	LiDAR	Zephir®	Cornell University
20	Torre de Medição (100 metros)	-	-
111	LiDAR	Zephir®	Cornell University
25	Torre de Medição (100 metros)	-	-
191	LiDAR	Windcube®	Leosphere
29	Torre de Medição (100 metros)	-	-

Esses aparelhos estavam montados ao longo do terreno na seguinte disposição:



Figura 4 - Disposição dos aparelhos de medida cujos dados serão estudados

A utilização de diversas tecnologias de medição num espaço relativamente pequeno permite, para além de uma variedade mais alargada de variáveis medidas, analisar a precisão e exatidão dos valores medidos por tecnologias de ponta (LIDAR'S e Wind Profilers), comparando-os com as medições por métodos de precisão comprovada (Torres de Medição equipadas com anemómetros ultrassónicos).

4. Tecnologias Utilizadas

Várias tecnologias de medição foram utilizadas na campanha de medição concretizada na Serra do Perdigão. Por terem princípios de funcionamento distintos, todos os aparelhos usados apresentam vantagens e desvantagens no que toca à sua utilização e à qualidade dos dados obtidos. Faz-se de seguida uma verificação das principais características desses aparelhos e tecnologias.

4.1 LiDAR Wind Profiler

A ideia de aplicar a tecnologia laser na exploração eólica e compreensão de fenómenos atmosféricos é quase tão antiga como o próprio laser [5]. Presentemente, é a tecnologia mais promissora para a medição remota do regime de ventos de um determinado local.

A primeira aplicação de laser no estudo da atmosfera tinha como objetivo investigar condições de visibilidade e determinar a altura das nuvens, utilizando a refração e reflexão de luz por parte de partículas de poeira e aerossóis presentes no ar. À medida que se desenvolviam lasers mais potentes e se aumentava a sofisticação e sensibilidade das máquinas que os usavam, foi possível estudar a pressão do ar, os gases que o constituem, incluindo componentes vestigiais do ar atmosférico [5].

Para além disso, a ideia de existir um aparelho com a capacidade de, ao nível do solo, medir de forma confiável o vento e as variáveis de estado do ar atmosférico (utilizando diferentes relações entre a interação ar-luz), até alturas de vários quilómetros, tornou antiquada a ideia de montar inúmeras torres de medição tradicionais [5].

O aparelho emite um feixe de luz (de forma contínua ou pulsada) com uma frequência bem definida e conhecida, feixe esse que é parcialmente refletido na interação com as partículas em suspensão no ar. Os sistemas LiDAR (*Light Detection and Ranging*) podem emitir radiação na gama do infravermelho, visível ou ultravioleta. Radiação em diferentes secções do espectro luminoso interage de maneira diferente com os diferentes fenómenos atmosféricos, permitindo inferir várias propriedades do ar e do seu escoamento (temperatura, composição, velocidade). A pequena divergência de um feixe laser e o seu consequente pequeno volume permitem uma alta resolução até algumas centenas de metros para LiDARs de feixe contínuo, e até umas dezenas de quilómetros para os LiDARs de feixe pulsado [2]. O feixe, depois de refletido por partículas contidas no ar, regressa ao aparelho afetado de um desvio da frequência, quando comparado com o feixe originalmente emitido. A diferença entre as frequências do feixe emitido e refletido é a chamada frequência de Doppler, que é lida pelo LiDAR. É possível relacionar esta

diferença na frequência do feixe luminoso com a velocidade da partícula responsável pela sua reflexão [5].

$$f = f_0(1 + v/c) \quad (7)$$

A equação acima relaciona a frequência do feixe refletido (f) com a frequência do feixe emitido (f_0), a velocidade da partícula responsável pela reflexão (v) e a velocidade da luz no ar (c) [5].

Escrito de uma outra maneira:

$$v = c \left(\frac{f}{f_0} - 1 \right) \quad (8)$$

Esta expressão apenas permite calcular a componente da velocidade com a mesma direção do feixe luminoso, ou seja, só é possível calcular a velocidade com que a partícula se afasta ou se aproxima do feixe luminoso (velocidade radial v_r). Por esta razão, não será de grande utilidade ter um feixe luminoso a apontar apenas numa direção. Assim, é utilizada uma técnica de medição na qual o emissor laser roda em torno da vertical, obtendo a leitura da velocidade dos pontos na periferia de um cone imaginário descrito por esse movimento [5].

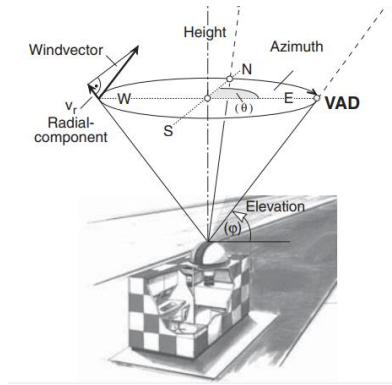


Figura 5 - Funcionamento de um LiDAR com a técnica VAD

Esta técnica, denominada de VAD (*Velocity-Azimuth Display*), por relacionar a velocidade com o ângulo de azimute, permite relacionar a velocidade radial como sendo:

$$v_r = -u \sin(\theta) \cos(\varphi) - v \cos(\theta) \cos(\varphi) - w \sin(\varphi) \quad (9)$$

As componentes u , v e w são as componentes Oeste-Este, Sul-Norte e vertical do vento, respectivamente. Por sua vez, θ é o ângulo de azimuth (sentido inverso a partir de Norte) e φ é o ângulo de elevação. O resultado esperado são medições velocidade na direção do feixe laser, LOS^1 , versus o ângulo de azimuth, que podem ser aproximadas por uma função seno:

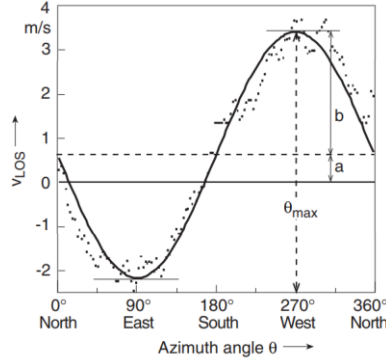


Figura 6 - Pontos de Medição pelo sistema VAD e respectiva curva de ajuste

Assim, a velocidade radial poderá ser calculada como função da amplitude b , do *offset* a e da fase θ :

$$v_r = a + b \cos(\theta - \theta_{m\acute{a}x}) \quad (10)$$

Consequentemente, poderá ser calculado o vetor tridimensional do vetor velocidade do vento:

$$\vec{v} = (u, v, w) = (-b \sin(\theta_{m\acute{a}x})/\cos(\varphi), -b \cos(\theta_{m\acute{a}x})/\cos(\varphi), -a/\sin(\varphi)) \quad (11)$$

Desta equação, pode extrair-se a velocidade horizontal:

$$\begin{aligned} v_h = \sqrt{u^2 + v^2} &= \sqrt{(-b \sin(\theta_{m\acute{a}x})/\cos(\varphi))^2 + (-b \cos(\theta_{m\acute{a}x})/\cos(\varphi))^2} \\ &= b/\cos(\varphi) \end{aligned} \quad (12)$$

A velocidade vertical:

¹ LOS – Line of Sight, velocidade medida na direção do feixe laser.

$$w = -a/\sin(\varphi) \quad (13)$$

E a velocidade total:

$$|v| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (14)$$

O LiDAR permite a medição das componentes da velocidade do vento a diversas alturas discretas. Como foi dito anteriormente, é de extrema conveniência conseguir caracterizar o regime de ventos de uma determinada zona sem os custos de instalação e manutenção associados a uma torre de medição. Para além disso, o facto de ser possível obter medições até à altura varrida pelas pás de uma turbina (e muito mais), permite estimar com muita mais certeza os esforços a que toda a estrutura poderá vir a estar sujeita, já que os dados de previsão do perfil de velocidades são baseados em medições a alturas discretas e não extrapolados de medições a alturas mais baixas, como é o caso das torres de medição.

Medir perfis de velocidade verticais e caracterizar o regime de ventos de uma zona é o objetivo da utilização de LiDARs nesta campanha de medição. Não é, no entanto, a única aplicação de sistemas LiDAR na área do aproveitamento eólico. Esta tecnologia encontra lugar, também, no topo das *nacelle*, na área de previsão de ventos a montante da turbina, de forma a permitir que o aparelho altere a sua posição ou o ângulo de ataque das pás, na tentativa de reduzir o erro de alinhamento da *nacelle* com o vento e proteger a torre de esforços desnecessariamente exagerados. Esta tentativa de otimizar o aproveitamento energético está dependente da obtenção de dados precisos e o mais próximos possível do estado real do vento antes de atingir a *nacelle*. Um erro severo de medição pode ter o efeito contrário ao desejado, aumentando o carregamento da estrutura e diminuindo o rendimento do aproveitamento energético, pelo que é fulcral que os dados de vento obtido sejam fidedignos [6].

A correção dos dados obtidos tem sido o “calcanhar de Aquiles” desta tecnologia em locais que não o oceano (para parques *offshore*) ou planícies e planaltos [7]. Apesar de todas as conveniências que trazem ao mundo da produção de energia limpa, os dados obtidos em zonas montanhosas ou pouco planas, não têm conseguido estar de acordo com os padrões de qualidade a que as torres de medição e os seus anemómetros nos têm habituado. Isto foi tido em conta durante todo o trabalho e, por isso, a qualidade dos dados foi testada sempre que possível.

4.2 Estações de Medição

Consideradas os “pilares” dos estudos de regimes de ventos, para o aproveitamento eólico e não só, as torres de medição têm sido responsáveis pela recolha de dados precisos e exatos ao longo de décadas.

A torre propriamente dita serve de suporte a diversos aparelhos de medida, que podem recolher dados sobre direção, sentido e velocidade de vento, e outros dados meteorológicos como a precipitação, temperatura do ar e a pressão atmosférica. Às diferentes alturas de medição, estão instalados os diferentes aparelhos de medida que podem ir desde os tradicionais anemómetros de copos e cata-ventos, até anemómetros ultrassónicos. As torres utilizadas nesta campanha de medição estavam apenas equipadas com anemómetros ultrassónicos, mas a utilização de anemómetros de copos é comum neste tipo de estruturas.

A medição direta das características de vento requer, no entanto, que a torre chegue à altura a que se quer medir. Assim, para medir a velocidade do vento à altura da *nacelle* de uma turbina a 200 metros *a.n.s.*², uma torre de medição necessita de ter uma altura mínima de 200 metros. Também é possível, não medindo diretamente a velocidade de vento a estas alturas, extrapolar o valor da velocidade a 200 metros, por exemplo, a partir das medições de velocidade a alturas mais baixas. Na indústria da Energia Eólica é recomendada a medição à altura de pelo menos 2/3 da altura do eixo do rotor, para que possam ser extrapolados os perfis de velocidade para altura superiores. No entanto, uma extrapolação admite a manutenção do perfil de velocidades do vento em altura, algo que nem sempre corresponde à realidade.

4.3 Anemómetro de copos e cata-ventos

Os anemómetros de copos continuam a ser bastante utilizados na indústria do vento, pelo seu preço relativamente baixo, resposta linear para uma gama de velocidade de vento suficientemente alargada e capacidade de resistir a condições meteorologicamente adversas [8].

Os anemómetros de copos têm vindo a ser desenvolvidos durante décadas, com a sua invenção a datar o século XIX. Deste então, este aparelho de medição tem sofrido diversas mudanças em relação ao desenho inicial, sendo a mais óbvia a configuração com três copos em vez de quatro, como tinha a versão original. Estas mudanças vieram fruto de estudos iniciais sobre o número ótimo de copos, comprimento ideal dos braços do anemómetro, aerodinâmica dos copos, erros causados por flutuações no escoamento

² Acima do nível do solo

atmosférico, entre muitos outros. À medida que a indústria da produção de energia elétrica a partir do vento exigia anemometria mais exata e precisa, seguiam-se estudos sobre a resposta destes medidores a escoamentos turbulentos e sobre a forma ótima de calibração destes aparelhos. Como a regular calibração dos anemômetros de copos não é prática, porque exigiria a sua desmontagem, fizeram-se estudos com o objetivo de perceber de que forma as condições climáticas, o envelhecimento dos anemômetros, a não uniformidade dos escoamentos e as incertezas durante o processo de calibração afetam as medições dos anemômetros de copos [8].

Para colmatar a incapacidade que um anemômetro de copos tem de medir a direção do vento, normalmente também são montados na torre de medição cata-ventos, que têm como função detetar a direção de que sopra o vento.

A incapacidade de detetar a direção e a inclinação do vento, bem como a lenta resposta a flutuações no escoamento, levaram à procura de novas tecnologias para substituírem a anemometria de copos. Apesar de essas tecnologias (LiDAR, SoDAR, anemometria sónica) serem, hoje em dia, usuais no estudo do escoamento atmosférico para as mais diversas áreas, cabe aos anemômetros de copos fazerem a ponte entre o passado e o futuro. Apesar de todos os avanços existentes, nenhum outro aparelho de medição de velocidade de vento conta com tantos estudos e *know-how* sobre o seu funcionamento.

4.4 Anemômetros Ultrassónicos

Como dito anteriormente, a anemometria de copos, apesar de simples e relativamente barata, apresenta algumas desvantagens. Isto levou ao desenvolvimento de novas tecnologias que colmatassem essas falhas, e ao aparecimento de anemômetros sónicos.

O aparecimento de estudos de turbulência no fim da década de 60 foi impulsionado pelos avanços nas tecnologias de anemometria sónica, recolha e processamento de dados [9].

Os anemômetros sónicos ofereciam claras vantagens sobre as outras tecnologias de medição utilizadas em micrometeorologia (anemômetros de copos e medidores de fio quente, por exemplo). Não possuem partes móveis, pelo que também não possuem inércia que tenha de ser vencida aquando a aceleração e desaceleração do vento. Assim, pode ter uma frequência de operação bastante mais elevada que anemômetros de copos, por exemplo [9].

Um anemômetro sónico mede as diferentes componentes de velocidade do vento através da emissão e receção de sinais acústicos que são transmitidos ao longo de um curso fixo em ambos os sentidos. Estes

aparelhos são capazes de medir velocidades de vento entre os 0 e os 60 m/s , com uma resolução de 1 cm/s , a frequências de 100 Hz . São esta frequência e resolução que permitem ao anemómetro sónico medir rápidas variações na velocidade do vento e estruturas turbulentas à escala de apenas alguns centímetros [10].

Este tipo de aparelhos opera com base na medição do tempo que um sinal acústico demora a percorrer a distância entre transdutores (emissor e recetor). Este tempo é função da distância entre os transdutores, da velocidade do som e da velocidade do vento paralelo ao eixo imaginário que liga os dois transdutores [10]. Assim, o tempo que o sinal demora a percorrer a distância entre transdutores é calculado pela seguinte expressão:

$$t = L/(v + c) \quad (15)$$

Onde L é a distância entre os transdutores, v é a velocidade do vento com o sentido e direção do sinal acústico e c é a velocidade do som.

Como a velocidade é calculada pelos anemómetros sónicos com base num tempo em trânsito, esta medição é independente da temperatura, humidade relativa e pressão. A velocidade é então calculada pela seguinte equação:

$$v = L/2 (1/t_1 - 1/t_2) \quad (16)$$

Onde t_1 e t_2 são os tempos que o sinal acústico leva a percorrer a distância entre os dois transdutores em ambos os sentidos [11]. A colocação de três pares de transdutores em três eixos distintos permite ter uma medição tridimensional do vetor velocidade [10].

A sensibilidade destes aparelhos pode levar a que as medições sejam afetadas pela presença do próprio medidor, dos transdutores e das hastes que os suportam. Tem havido esforços para minimizar este efeito, desde a mudança do design do aparelho, até uma calibração minuciosa. Outros problemas de medição podem ser causados por gotículas de água, neve ou congelamento de transdutores. Estas questões podem, no entanto, ser minimizadas através da consulta da qualidade do sinal recebido e rejeição de dados com fraca qualidade, bem como com a instalação de sistemas anti-congelamento [10].

5. Processamento dos Dados da Campanha de Medição

Este trabalho teve como base a análise de dados obtidos por diversos aparelhos de medida instalados ao longo de um vale e em duas colinas, em Vila Velha de Ródão.

Numa fase inicial, esses dados tiveram de ser tratados, para garantir que não existiriam erros de leitura a afetar os resultados obtidos.

Posteriormente, analisou-se e caracterizou-se o escoamento nos locais onde estão instalados os dispositivos descritos na Tabela 1. Esta análise foi inicialmente feita utilizando todos os dados válidos e relevantes medidos, e foi seguida de um estudo do escoamento durante um período diurno e um período noturno e da sua comparação.

A última fase teve como objetivo garantir que se utilizavam os dados relativos a períodos em que todos os dispositivos utilizados estivessem a medir simultaneamente. A campanha de medição teve a duração de vários meses, mas nem todos os dispositivos de medição estiveram a recolher dados durante toda a duração. Para além disso, falhas de leitura (limpas na fase inicial) levam a que, mesmo em períodos que todos os dispositivos estiveram a medir, possa haver descontinuidades de leitura.

5.1 Abertura dos ficheiros e criação de código

Uma campanha como a levada a cabo na Serra do Perdigão produz uma quantidade de dados cujo processamento e interpretação constituem só por si, um desafio. O tempo e a atenção necessários a essas tarefas foram algo penalizadores, e acabaram por consumir uma parte substancial do tempo disponível para a realização deste trabalho. Era, contudo, indispensável essa fase, de outro modo não haveria confiança suficiente para se poderem tirar conclusões a partir desses dados experimentais.

Os dados dos aparelhos de medida utilizados foram organizados em tabelas. O grande número de variáveis medidas pelos anemómetros sónicos e pelos LiDARs, muitas delas a mais do que uma altura, levou a tabelas com um número de colunas bastante grande. Já a quantidade de pontos temporais de leitura levou a um grande número de linhas. O resultado foram tabelas de grandes dimensões (as relativas às torres, por exemplo, eram constituídas por 29385 linhas e 3110 colunas), que se mostraram um desafio para programas como o Microsoft Excel, que demonstrou alguma lentidão na abertura e manipulação destes ficheiros. Foi, assim, necessário abrir os ficheiros de uma outra forma que permitisse tratar e filtrar os dados importantes, para que só posteriormente fossem abertos no Microsoft Excel, que foi o *software* escolhido para a criação de gráficos.

Optou-se, assim, pela utilização da linguagem *Python* conjugada com o *software Jupyter Notebooks*, que permitiu uma manipulação mais rápida dos dados, bem como uma apresentação mais clara de todos os passos tomados. A utilização da linguagem *Python* permite também a utilização de bibliotecas especificamente criadas para manipulação e análise de dados. Utilizaram-se, maioritariamente, a biblioteca *Pandas* para a organização dos dados em *DataFrames* e a biblioteca *Numpy* para a manipulação matemática dessas *DataFrames*.

Muitos dos ficheiros que continham os dados a utilizar estavam no formato *.csv* (*Comma-Separated Value*). A biblioteca *Pandas* dispõe de uma função que permite ler ficheiros deste formato, e foi essa função (*pandas.read_csv()*) que foi utilizada para abrir os documentos com esta configuração.

Certos ficheiros, como os das pequenas centrais meteorológicas instaladas juntos aos dispositivos do tipo RADAR, foram guardados no formato *netCDF*. Este é um formato bastante utilizado em áreas como a meteorologia, e a biblioteca *Pandas* não dispõe de nenhuma função para abrir este tipo de ficheiro. Assim, utilizou-se a biblioteca *Xarray* para abrir o ficheiro e, posteriormente, criou-se uma *DataFrame* com a biblioteca *Pandas*.

A criação de um código em *Python*, apesar de ser uma tarefa inicialmente morosa, possibilitou uma manipulação rápida dos dados. Torna-se, assim, mais fácil e mais imediata a filtragem dos dados e “limpeza” de medições erradas e/ou falta de medições, bem como a alteração dos parâmetros de filtragem e os seus valores. Conseguiu-se, com isto, criar algo que permite analisar um grande conjunto de dados, não apenas os aqui estudados, de forma rápida e eficiente.

5.2 Filtragem dos dados

Todos os aparelhos de medição estão preparados para recolher informação sem intervenção humana. Apesar de ser vantajoso não requererem uma constante monitorização do processo de recolha de dados, isto aumenta substancialmente a probabilidade de existirem erros de leitura, ou porque os dispositivos não estavam em condições normais de funcionamento, ou porque as medições foram tiradas em condições longe das ideais. Estes erros de leitura, se não forem detetados, podem “contaminar” os resultados, dificultar as conclusões, ou mesmo levar a conclusões que se afastam da realidade.

Na tentativa de impedir que erros de leitura passem despercebidos aquando a manipulação dos dados, muitos aparelhos de medida utilizam números específicos, muito maiores ou muito menores do que valores que as variáveis possam tomar. Assim, qualquer cálculo, gráfico ou manipulação de dados com

erros, terá resultados fora do espectável pelo utilizador. No caso dos LiDARs, esse número era 9999 ou 9998. Começou-se, por isso, por eliminar quaisquer valores superiores a 9990 nas principais colunas.

No entanto, este tratamento prévio de dados feito pelo próprio dispositivo mostrou-se insuficiente para eliminar todos os valores mal medidos, e alguns dos valores de velocidade e desvio padrão, por exemplo, continuavam bastante superiores ao que seria espectável. Assim, uma simples abordagem que consistisse na eliminação de valores iguais ou superiores a 9990 não seria o suficiente para garantir a exclusão de todas as medições imperfeitas. Foi necessário filtrar, também, outros parâmetros, como é o caso do desvio padrão, que também é medido pelos LiDARs. Não é de esperar que existam, durante um intervalo tão curto de tempo, variações significativas na velocidade do vento. Variações pontuais, rajadas de vento forte, por exemplo, são uma possibilidade, mas não deverão ser frequentes o suficiente para afetar consideravelmente o desvio padrão, pelo que um desvio padrão elevado estará provavelmente associado a erros de medição não identificados pelo dispositivo. Assim, optou-se por eliminar linhas cujos valores de desvio padrão excedessem os 5 m/s. O valor de 5 m/s foi escolhido por ter sido encontrado várias vezes na literatura sobre esta matéria em análise. Outro valor poderia ser utilizado, por não haver nenhuma norma que aconselhe ou restrinja um valor de desvio padrão limite a ser filtrado.

Existem também parâmetros internos aos dispositivos, ou seja, parâmetros que procuram ilustrar o estado do aparelho de medida e a qualidade da recolha de dados. Por vezes, e por motivos variados, os dispositivos não conseguem fazer o número de medições que deveriam e, por isso, os parâmetros são calculados com base em menos informação do que seria desejável. Optou-se, então, por eliminar quaisquer linhas de recolha de dados e cálculos estatísticos com menos de 90% de disponibilidade de informação (*“Data Availability”* no *Windcube®* e *“Packets in Average”* no *Zephir®*). Mais uma vez, este valor foi encontrado na literatura consultada, bem como filtragens para disponibilidade de informação inferior a 80 %. Optou-se por uma abordagem mais agressiva na eliminação de dados recolhidos com disponibilidade de dados que não a ideal, mas seria interessante perceber de que maneira a alteração do limite mínimo de disponibilidade afetaria os resultados da análise de dados. No entanto, pelo limite de tempo imposto à realização desta dissertação, não foi possível fazer tal comparação, e apenas o valor de 90% foi utilizado.

Os anemómetros sónicos montados nas torres de medição, por sua vez, não apresentam um valor padrão para assinalar uma leitura detetada como errada. O procedimento para a limpeza dos dados das torres começou, por isso, com a eliminação das linhas cujo valor de desvio padrão das velocidades, a qualquer uma das alturas, fosse superior a 5 m/s. Contudo, depois desta filtragem e após uma observação

dos valores da velocidade média horizontal ao longo do tempo, notou-se que ainda havia registros de velocidades médias de cerca de 30 m/s , que apareciam aleatoriamente ao longo do tempo. É improvável que o regime de ventos daquele local, ou qualquer outro na realidade, produza espaçada e esporadicamente, em períodos de dez minutos, velocidades de vento médias a rondarem as três dezenas de metros por segundo. Tomaram-se, por isso, medidas adicionais na eliminação de dados errados, e retiraram-se todas as linhas com valores de velocidade iguais ou superiores a 30 m/s . Estes valores, desvio padrão de 5 m/s e velocidade média de 30 m/s , são valores utilizados como primeira aproximação à análise do regime de ventos no local em causa, e poderão ser alterados em futuras análises.

A baixa temperatura pode também ter implicações nas medições. O congelamento dos sensores, por exemplo, pode levar à recolha de dados errados ou à não recolha de dados. No entanto, não foram tidos em consideração quaisquer restrições a baixas temperaturas porque esta grandeza nunca foi, durante o período de medição, baixa o suficiente para pôr em causa os dados recolhidos.

Os dados retirados das torres necessitaram de uma outra correção, que não foi necessária nos dados dos LiDARs. Enquanto que estes aparelhos de medição remota conseguem medir a direção do vento relativamente ao Norte geográfico, os anemómetros sónicos utilizados apenas reconhecem a direção do vento relativamente ao seu referencial próprio. Como existe alguma dificuldade de montar as torres perfeitamente alinhadas com o Norte geográfico, e como a montagem dos anemómetros sónicos na torre também não permite orientá-los precisamente de forma simples, é necessário aplicar um *offset* aos dados de direção, para compensar estes desalinhamentos. Estes valores de *offset* foram encontrados no *Datalogger* de cada torre e aplicados a cada aparelho.

Poderia ter sido tomada uma aproximação mais agressiva em relação aos dados (uma média de 30 m/s num período de medição de dez minutos continua a ser um pouco elevada, por exemplo), bem como a utilização de alguns outros parâmetros de eliminação, como a eliminação de registros de baixas velocidades (menores que 4 m/s , por exemplo), mas correr-se-ia o risco de apagar dados que, apesar de fora do expectável, não tivessem qualquer tipo de erro de medição associado, que não só seria um desperdício de boas medições, como diminuiria ainda mais um volume de prova que já de si é pequeno. Tudo isto foi tido em mente durante todo o processo de análise dos dados, e garantiu-se a possibilidade de alterar estes valores à medida que se percebia melhor o regime de ventos local.

Foi remetida para o Anexo E a tabela que mostra a diferença entre o número de ocorrências antes e depois da filtragem efetuada, para os meses de campanha analisados.

A análise dos dados recolhidos nas torres de medição esteve sujeita a alguns percalços que atrasaram essa mesma análise e colocaram em causa a confiança em alguns dos resultados obtidos. Durante a realização deste trabalho foram existindo dúvidas sobre o significado das variáveis que ocupavam algumas colunas. Essas dúvidas foram esclarecidas com a análise crítica dos valores que constituíam as colunas, e com a colocação das questões ao corpo responsável pelos dispositivos em questão. Para além dos percalços causados por títulos pouco claros, alguns dos títulos nas torres analisadas estavam trocados. Por exemplo, na coluna titulada “Twr20_57m_WS_hor_mean”, onde “WS” se refere a “*Wind Speed*”, estão guardados os dados relativos à direção do vento, dado que os valores que constituem esta coluna variam dentro de um intervalo de 0 a 360. Por sua vez, a coluna “Twr20_57m_WD_hor_mean”, onde “WD” se refere a “*Wind Direction*”, guarda os dados relativos à velocidade do vento. Estes pormenores, que poderiam ser evitados aquando a organização final dos dados, dificultam uma manipulação rápida, eficaz e confiante dos valores apresentados nos ficheiros.

Numa fase posterior da análise de dados, foi necessário garantir a simultaneidade das medições, ou seja, foi necessário encontrar os intervalos de tempo comuns às medições de cada aparelho. Esses intervalos de tempo deram-se apenas durante os meses de abril, maio e junho, com maio a ser o mês com mais ocorrências registadas em simultâneo.

Nessa fase, a análise foi feita a todos estes meses, mas inicialmente optou-se por utilizar o mês com o maior número de dados disponíveis (maio).

5.3 Informação contida nos dados

Os dados retirados de todos estes aparelhos de medida, distribuídos ao longo das colinas e do vale, permitem não só ter uma visão do escoamento limitado a um pequeno volume que envolve o dispositivo de medição, como também uma visão de campo, mais generalizada, através da utilização de medições concorrentes entre todos os aparelhos. Foram, por isso, adotadas duas abordagens: uma primeira análise onde se estudaram os dados de cada um dos aparelhos, e uma segunda que procura compreender a variação espacial das características de vento (noção de campo).

O terreno no local estudado apresenta algumas irregularidades que, apesar de não serem tão aparentes como as colinas, terão influência no escoamento atmosférico. Para perceber melhor como varia a topografia nos locais a estudar, fizeram-se “cortes” no terreno, como mostra a Figura 7. Aplicaram-se estes cortes do terreno segundo os principais pontos cardiais em redor dos aparelhos de medição, cortes esses que estão ilustrados no Anexo A. Estes cortes mostram claramente a existência de protuberâncias

no terreno que, evidentemente, darão lugar a zonas com declive positivo e zonas com declive negativo, mais ou menos acentuado. Declives negativos, poderão também estar associadas a zonas de recirculação. A recirculação é causada pelas áreas de baixa pressão que se formam pela incapacidade de o fluido acompanhar a repentina variação de declive do terreno. Caso estas zonas de recirculação afetassem o escoamento no volume de prova de um LiDAR, por exemplo, existiriam variações acima do espetável na direção e velocidade do vento em altura.

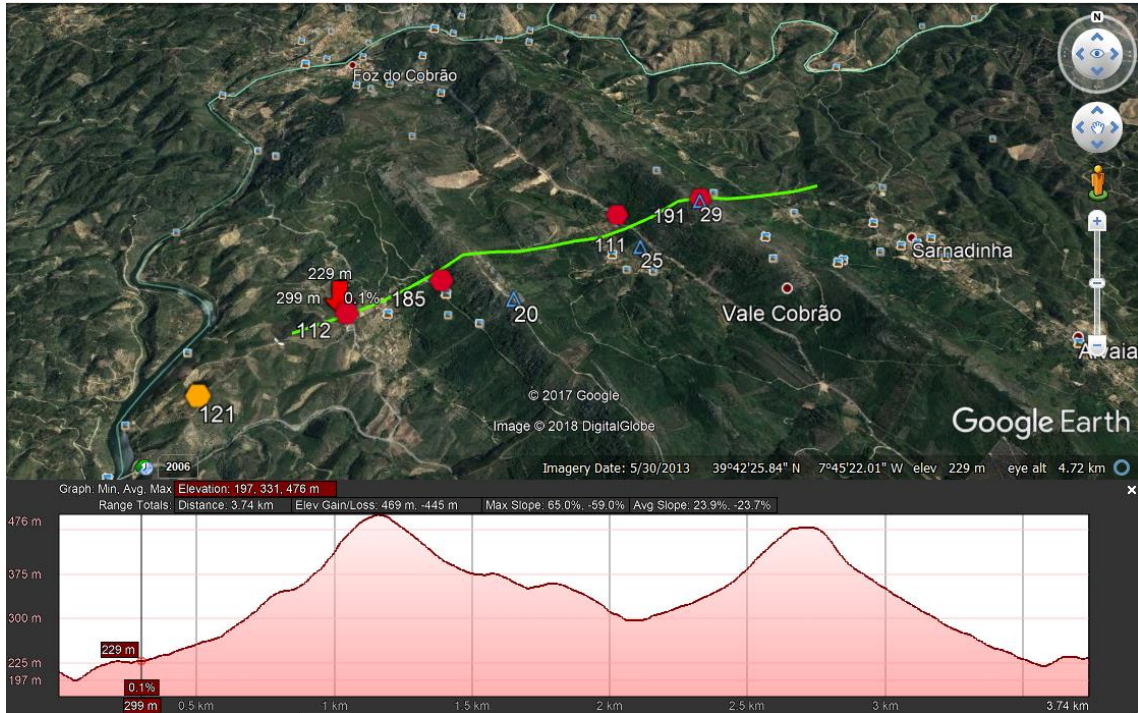


Figura 7 – Vista de corte do local a estudar, através da linha imaginária que liga aproximadamente todos os aparelhos de medição utilizados

Para o cumprimento do princípio de conservação da massa, quando o fluido encontra declives positivos acelera de forma a acompanhar a camada superior que não é afetada pelo relevo e que leva ao aumento da velocidade do vento em altura (v_{∞}).

Uma melhor compreensão do efeito da forma e cobertura do terreno na velocidade do vento pode ser obtida através da visualização dos perfis médios de velocidade para várias direções. Para isso, as diferentes ocorrências foram agrupadas em função da direção do escoamento a uma altura de referência de 100 metros *a.n.s.*. Cada direção corresponde a um setor com uma amplitude de $22,5^{\circ}$ permitindo, assim, a caracterização do escoamento em 16 direções diferentes. Posteriormente, foi calculada a média das velocidades para cada uma das alturas a que um determinado dispositivo é capaz de medir, para cada uma das 16 direções usadas. Com estes gráficos, semelhantes ao exemplo da Figura 8, espera-se perceber

qual a forma do perfil de velocidades médio em cada uma das direções e, talvez mais importante, como varia essa forma com a direção. Isto permitirá uma análise de causalidade entre as características topográficas do terreno e a forma do perfil de velocidades.

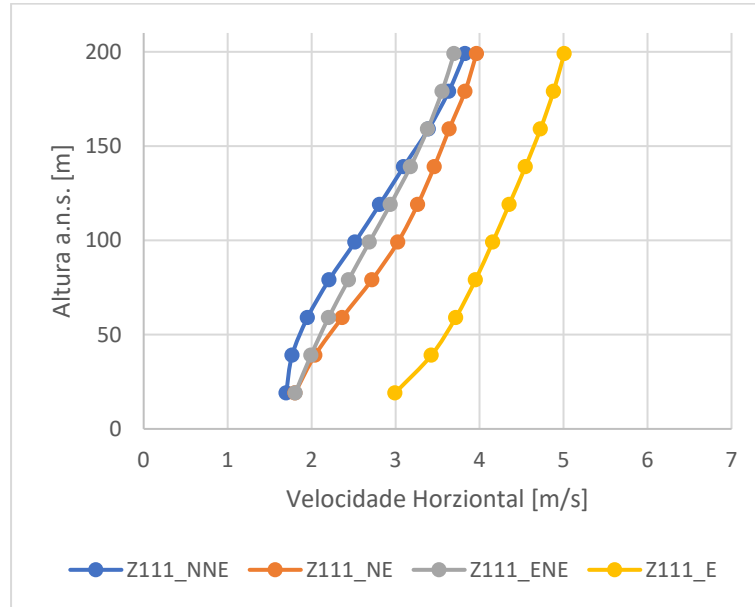


Figura 8 - Exemplo da representação de perfis de velocidade para diferentes direções de vento

Podem ser tiradas ilações semelhantes a partir do gráfico de *shear factor*, admitindo que o perfil pode ser descrito pela Equação 5. Pela sensibilidade da escala logarítmica, as alturas de referência escolhidas devem ser o mais afastadas possível. No entanto, como a capacidade de medir em altura é bastante diferente entre as torres e os LiDAR, e para que os diferentes *shear factors* possam ser confrontados, utilizaram-se as alturas de 20 metros (a menor altura a que os Zephir® medem) e 100 metros (máxima altura a que as torres medem). O Windcube® mede apenas a partir dos 40 metros, pelo que também se calculou o *shear factor* para as alturas de referência de 40 e 100 metros. Depois de calculados os valores de *shear factor* entre diferentes alturas, é possível agrupá-los em função da direção do vento à altura de referência. Foi utilizada, como altura de referência, 100 metros *a.n.s.*, para que os resultados obtidos pudessem ser confrontados com os perfis traçados. Com a divisão dos fatores nas respetivas direções, calculou-se a média e traçaram-se gráficos que ilustram a maior ou menor abertura dos perfis médios de vento em função da direção do vento a 100 metros *a.n.s.*. A Figura 9 ilustra um exemplo destes gráficos traçados.

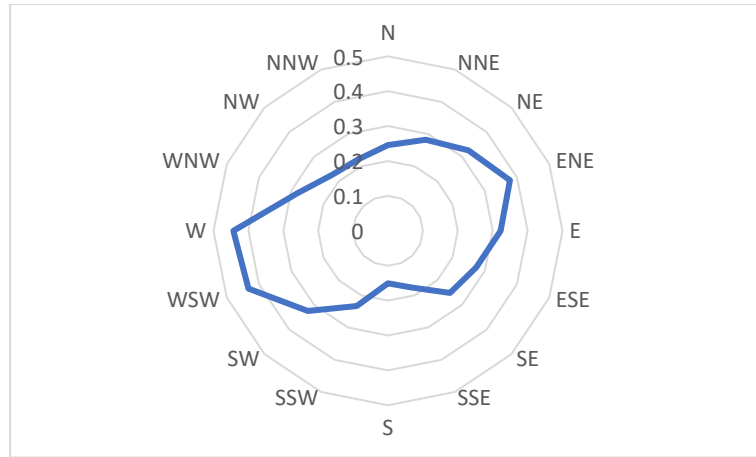


Figura 9 - Exemplo da representação de valores de shear factor médios para diferentes direções de vento

Foi também considerada importante a representação do número de ocorrências para cada uma destas direções. Isto permite tirar conclusões em relação ao escoamento e às suas características, dado que um volume de prova pequeno poderá levar a conclusões baseadas em acontecimentos esporádicos, que não traduzem a realidade de forma satisfatória. De forma de representar o número de ocorrências para cada de direção, traçaram-se gráficos do tipo “radar”, algo semelhantes aos do *shear factor*. Um exemplo de um gráfico de ocorrências é apresentado na Figura 10.

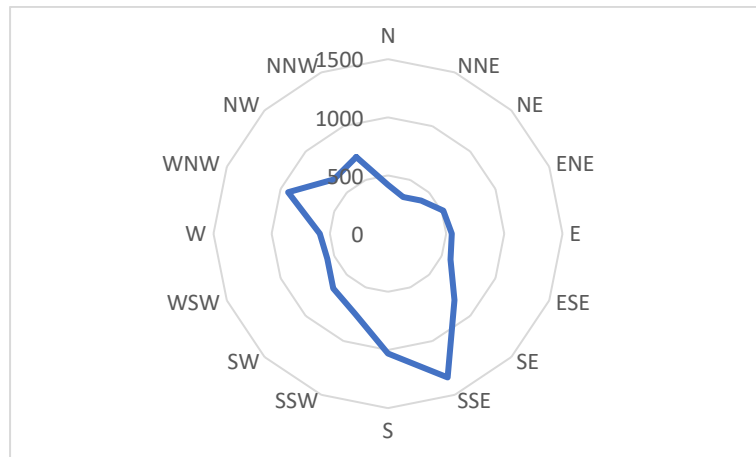


Figura 10 - Exemplo da representação de ocorrências de diferentes direções de vento

A comparação de intensidade de turbulência nos diversos pontos de medição foi conseguida a partir de um gráfico de pontos comumente utilizado na indústria eólica, que relaciona a intensidade de turbulência com a velocidade horizontal do escoamento a uma certa altura. Como os aerogeradores apenas conseguem aproveitar a energia do vento a partir de uma certa velocidade do escoamento, este gráfico é muitas vezes truncado, de forma a mostrar apenas a intensidade de turbulência para as

velocidades relevantes. A Figura 11 mostra um destes gráficos, com a velocidade a ser contabilizada a partir dos 3 m/s.

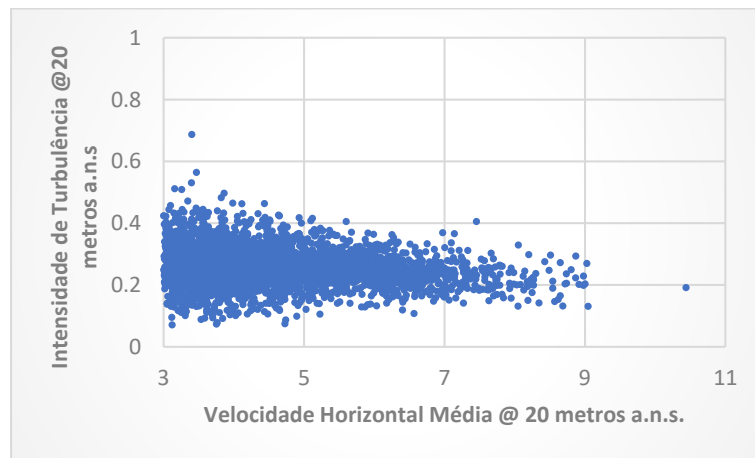


Figura 11 - Exemplo da representação da intensidade de turbulência versus a velocidade horizontal média a uma altura definida

As questões que foram surgindo ao longo deste trabalho requereram, muitas vezes, uma análise dos dados que não as atrás mencionadas. Nessas situações foram traçados e explicados os gráficos que melhor expõem o problema e apontam para a solução.

6. Análise de Resultados

Pretende-se, neste capítulo, estabelecer um panorama geral acerca do regime de ventos sentido ao longo do tempo no local das medições, e perceber que fenómenos mecânicos e/ou térmicos são responsáveis por esse regime.

Começou-se por uma análise às medições do Windcube® e da estação de medição 29 durante períodos em que ambos os dispositivos estivessem a medir. Com isto, procurou-se perceber qual a precisão e exatidão dos dados do LiDAR neste tipo de terreno. Foi também feita uma análise à sensibilidade do LiDAR a variáveis ambientais e utilizou-se, para isso, a norma IEC 61400.

Seguiu-se uma análise às medições dos LiDAR e estações de medição instaladas no terreno. Procurou-se perceber, em cada um dos locais de medição, quais as direções predominantes do vento e de que forma a orografia afetou a inclinação do escoamento às diferentes alturas de medição. Seguiu-se uma análise à velocidade horizontal do escoamento e a forma como esta varia com o afastamento ao solo e com a direção do vento. Fez-se, também, uma análise ao *shear factor* e à forma como este parâmetro varia com a direção do escoamento, e um estudo da rotação do escoamento com a aproximação ao solo.

Na tentativa de se perceber qual a influência de fenómenos térmicos nos parâmetros medidos, filtraram-se e agruparam-se os dados em dois grupos, função da hora do registo: um grupo que corresponde ao período diurno (medições das 09h00 até às 16h00), e um outro que corresponde ao período noturno (medições das 22h00 até às 05h00). A análise feita anteriormente foi realizada para os dados de ambos os grupos, e os resultados foram comparados posteriormente.

6.1 Windcube® versus Torre 29

Como foi dito anteriormente, são múltiplas as vantagens de utilização de aparelhos de medição remota no apuramento da velocidade do vento. No entanto, apesar de todas as vantagens, a aplicação destas tecnologias na área da conversão da energia do vento tem sido questionada pela falta de fiabilidade das medições feitas em terreno complexo. Por esta razão, e para trazer alguma confiança aos dados obtidos pelos diversos dispositivos LiDAR, decidiu-se aproveitar a proximidade entre a estação de medição 29 (ou Torre 29) e o Windcube® (montados no cimo da colina Este) e comparar as medições destes dois aparelhos.

Num esforço para incorporar cada vez mais os dispositivos de medição remota na indústria eólica, foi atualizada a norma IEC 61400 que inclui agora um anexo dedicado à operação de sistemas de medição

remota [14]. Esta norma destina-se à medição do desempenho de um aerogerador, mas neste trabalho ajudará a especificar o procedimento para a comparação entre os dados recolhidos por um aparelho de medição remota e uma torre de medição montados na imediação um do outro.

Segundo a norma, para que seja válida a comparação entre estes dispositivos, deverão ser cumpridos alguns requisitos no que toca à aquisição de dados. Deverão ser utilizadas médias de dez minutos em ambos os aparelhos, e calculadas, para além das médias de velocidade, as médias de desvio padrão e registados os valores máximo e mínimo de cada período. O número de medições efetuadas em cada período de dez minutos deve ser registado, também. Deverá, ainda, existir uma sincronização temporal para 1% do intervalo médio, sincronização essa que deverá ser confirmada uma vez por semana, pelo menos [14]. Não existe registo deste último procedimento, pelo que não se pode confirmar que foi tomada esta precaução, o que introduz alguma incerteza na interpretação dos resultados.

A campanha deverá ter uma duração mínima de três meses e, após a filtragem, os dados deverão formar um período de análise de pelo menos 180 horas. Para se considerarem concluídos os testes de comparação, deverão existir pelo menos três pares de dados concorrentes para velocidades compreendidas entre os 4 e os 16 m/s [14], ou seja, deverão existir três pares de dados cujo valor medido pelo dispositivo de medição remota e pelo dispositivo de referência é igual.

Assim, fez-se uma interseção temporal entre a Torre 29 e o *Windcube*[®] para maximizar o número de registos concorrentes. O resultado foi um conjunto de 9290 registos, já após a filtragem falada anteriormente, que começam a 07 de abril de 2017, às 13h50, e terminam a 31 de julho de 2017, às 19h20. São, assim, cumpridos alguns dos requisitos descritos pela norma: ambos os aparelhos estiveram a medir em simultâneo durante mais de três meses, e o período de análise é superior a 180 horas. Quanto à existência de três pares de dados concorrentes, também isso é cumprido, dado que a todas as alturas existem sempre mais de três leituras iguais para *bins* entre os 4 e os 16 m/s .

6.1.1 Comparação dos dados obtidos

Foi feita uma primeira análise à concordância entre as direções medidas por cada um dos dispositivos. A Figura 12 apresenta os gráficos de pontos para as direções dos dois aparelhos de medida a 100 metros *a.n.s.*, tendo sido remetidos para o Anexo B os gráficos obtidos a todas as alturas a que ambos medem (40, 60, 80 e 100 metros), e a respetiva reta de regressão. Pela natureza circular deste parâmetro, é difícil uma regressão perfeita entre os dados. No entanto, apenas com a aplicação do *offset*, encontraram-se

valores de R^2 que rondam os 0,85, e uma reta de ajuste próxima da igualdade entre y (direção lida pelo *Windcube*®) e x (direção lida na Torre 29).

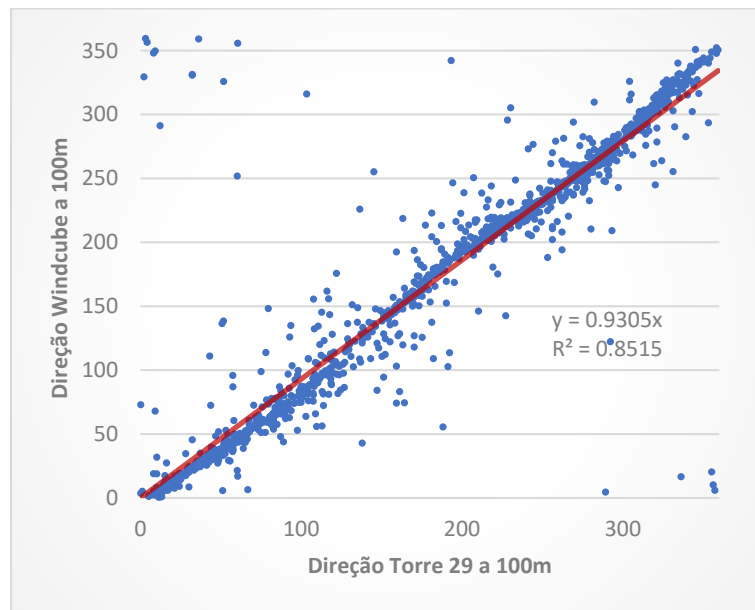


Figura 12 - Direção lida pelo *Windcube* versus direção lida pela Torre 29 @ 100m a.n.s.

Estes valores foram tidos como satisfatórios e em comparações futuras entre estes dois aparelhos utilizar-se-á a direção lida pela Torre 29 como sendo a direção a que soprava o vento naquela zona, num determinado instante. Numa análise mais cuidada destes gráficos pode observar-se, no entanto, um desvio maior em relação à reta de ajuste para direções entre os 180° e os 270°, sensivelmente. Uma análise inicial à posição relativa destes dois aparelhos gera uma preocupação no que toca ao efeito de esteira que pode afetar as medições do LiDAR para ventos que sopram do terceiro quadrante. A passagem do vento pela torre poderá afetar a sua trajetória e velocidade (efeito de esteira), o que poderá comprometer as medições do LiDAR para estas direções. Esta questão também é mencionada na norma IEC 61400, que apresenta algumas linhas guia relativamente à filtragem de dados potencialmente afetados pelo efeito de esteira causado pela torre de medição. Deverão, assim, ser traçados gráficos que relacionem o rácio entre os dados obtidos na torre e o sistema de medição remoto e a direção do vento. Todos os dados que tenham sido influenciados pela presença da torre de medição deverão ser excluídos [14].

Para ter algum termo de comparação no que toca ao benefício da implementação desta filtragem neste caso em particular, traçaram-se os gráficos de velocidade sem que esta fosse aplicada. Os gráficos obtidos a todas alturas estão disponíveis no Anexo B, com o gráfico para apenas a altura de 100 metros a.n.s. a ser apresentado na Figura 13. Obtiveram-se retas de regressão que rondam uma razão igual a 1,09 entre

as velocidades medidas pelo LiDAR e as velocidades medidas na torre, com um R^2 de aproximadamente 0,93.

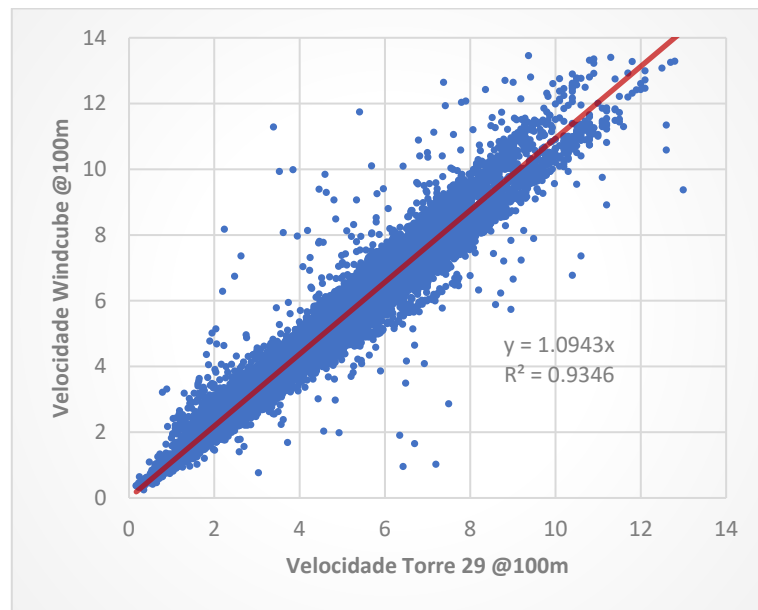


Figura 13 - Velocidade lida pelo Windcube versus velocidade lida pela Torre 29 @100m sem filtragem relativa ao efeito de esteira

Estes valores não variam consideravelmente com a variação da *a.n.s.*, mas o valor da razão entre as velocidades é um pouco superior ao que seria espectável, o que pode indicar que os valores lidos pelo dispositivo de medição remota estão, em parte, a ser afetados pela torre vizinha. No entanto, seria de esperar que o efeito da presença da torre na velocidade do escoamento se traduzisse numa desaceleração do vento, pela perda de energia fruto da interação entre o escoamento e a torre de medição, e não na sua aceleração. Não é, pois, provável que seja esta a explicação, mas antes qualquer aspeto caraterístico da tecnologia LiDAR utilizada nestas condições.

Na tentativa de melhorar a perceção de que fatores afetam esta diferença na medição de velocidades, traçaram-se gráficos que relacionam a razão entre as velocidades medidas e a direção do vento lido pela Torre 29. A Figura 14 mostra um gráfico traçado para a altura de medição de 100 metros, com o eixo y a representar a razão entre a velocidade da Torre 29 e a velocidade do *Windcube*® a essa altura, e o eixo x a representar a direção do vento, lida pelos anemómetros ultrassónicos da torre de medição. Foram traçados os gráficos para todas as outras alturas concorrentes, apresentados no Anexo B.

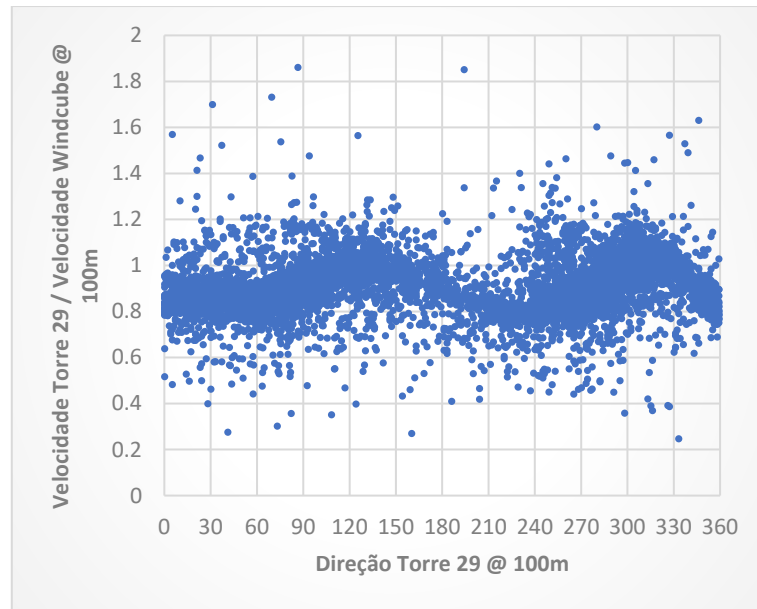


Figura 14 - Razão entre as velocidades @ 100m lidas pela torre e a velocidade lida pelo LiDAR versus a direção lida pela Torre 29 @ 100m

Seria de esperar que, caso se sentisse a presença da torre nas medições do LiDAR, que isso acontecesse para direções do terceiro quadrante, ou seja, para rumos entre os 180° e os 270° dado o posicionamento relativo dos dois equipamentos.

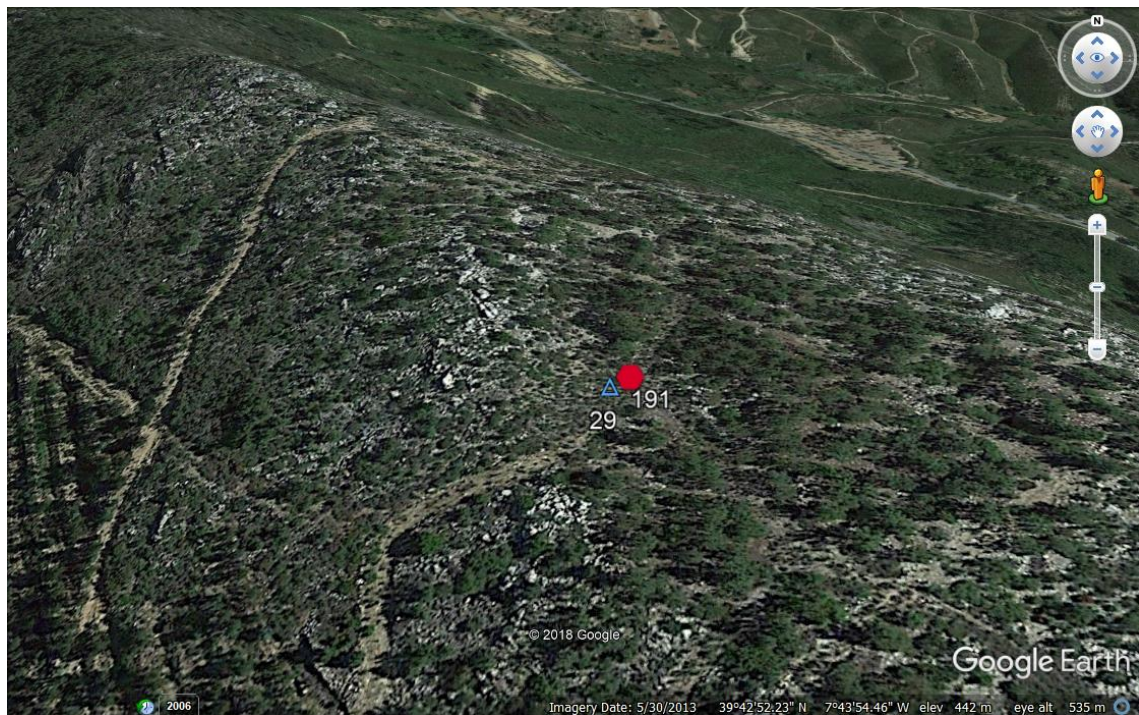


Figura 15 - Posição relativa entre a Estação de Medição n°29 e o Windcube®

Na Figura 14, e nos outros gráficos em anexo, parece, de facto que as velocidades medidas pelo *Windcube*[®] têm uma maior tendência a serem sobrevalorizadas para ventos que sopram desse quadrante, mais especificamente entre os 180 e os 240°. A Figura 16 faz um *zoom* às ocorrências entre os 150 e os 250° e torna-se mais aparente a sobrevalorização da velocidade, dado que poucos são os pontos acima da reta $y=1$.

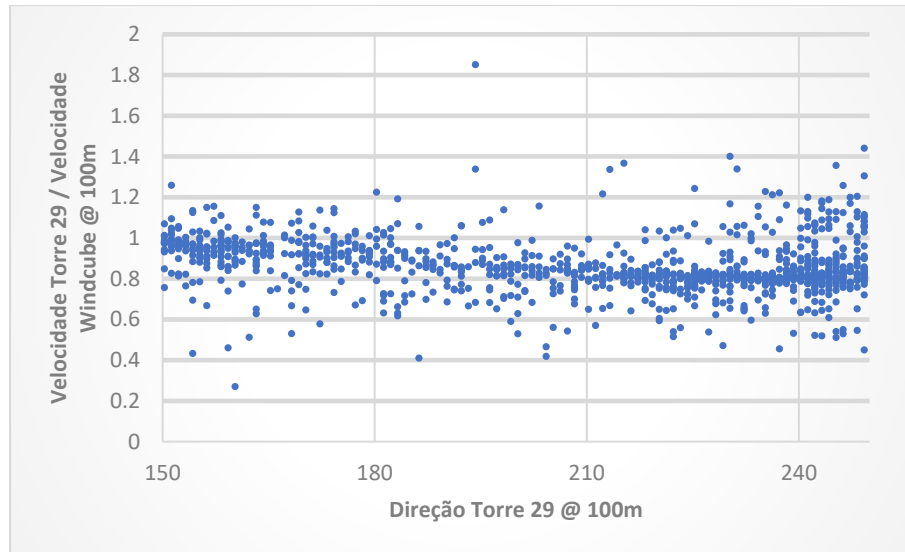


Figura 16 - Zoom para ocorrências entre os 150 e os 250°

Por esta razão, optou-se por eliminar, nesta comparação, todas as ocorrências medidas com a direção de vento entre Sul e Oeste. O número de ocorrências válidas desceu de 9290 para 7421, a reta de ajuste passou a ser mais próxima da igualdade entre y e x . O valor de R^2 desceu para valores que rondam os 0,92, uma diferença mínima, sem significado.

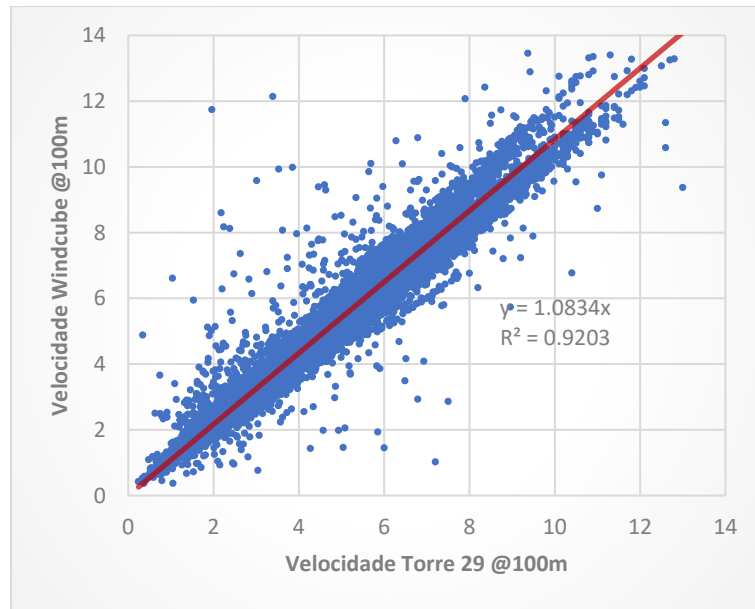


Figura 17 - Velocidade lida pelo Windcube versus velocidade lida pela Torre 29 @100m c/ filtragem relativa ao efeito de esteira

6.1.2 Sensibilidade a variáveis ambientais

O afastamento considerável da igualdade entre as medições registadas na torre e pelo Windcube® é, provavelmente, causado por variáveis ambientais [14]. Estas variações nas condições atmosféricas podem afetar a correção dos dados recolhidos pelos dispositivos de medição remota e aumentam a incerteza das medições [15]. É, então, importante compreender quais as variáveis ambientais que influenciam as medições dos LiDAR e de que forma o fazem. Para isso, realizaram-se testes de sensibilidade.

A forma mais simples de avaliar a influência de uma variável ambiental nas medições do LiDAR consiste na aferição dos desvios entre estas medições e os valores recolhidos por um sistema de referência (torre de medição, neste caso), em função de uma variável ambiental. Deverá existir cuidado para garantir que apenas variáveis independentes são contabilizadas. Caso isso não seja feito, e sejam escolhidas variáveis que estão relacionadas entre si, o mesmo efeito será contabilizado em duplicado e afetará a classificação da sensibilidade do LiDAR. Por outro lado, a omissão de variáveis ambientais que afetam diretamente as medições também irá contribuir para uma incerteza maior e para testes de sensibilidade conservativos [15].

Para perceber qual a significância de uma variável ambiental, será necessário avaliar o seu grau de influência nas medições. Uma variável ambiental é relevante quando a sensibilidade (produto do declive da reta de regressão e do desvio padrão da variável independente) é igual ou superior a 0,5 % ou o

coeficiente de correlação (produto da sensibilidade com R) é igual ou superior a 0,1 %. Caso seja cumprida uma ou todas essas condições para uma altura, deve ser concluído que a relevância dessa variável se alarga a todas as outras alturas [15]. Pelos dados que estavam disponíveis e tendo em atenção as condições climáticas e a topografia do local que envolve os dois dispositivos de medição, optou-se por testar a relevância da temperatura, do gradiente de temperaturas, da intensidade de turbulência, da humidade relativa, do *shear factor* e da rotação em altura. Seria interessante estudar a relevância da inclinação do escoamento, mas a variável da Torre 29 que deveria conter estes dados (“*Twr29_Xm_WD_inc_mean*”) incluía valores de inclinação de escoamento despropositados, mesmo a 100 metros *a.n.s.*, pelo que se optou por ignorar esta variável. Na Tabela 2, são apresentados os valores calculados na aferição da sensibilidade das medições do *Windcube*® para algumas das alturas. A tabela completa, com os valores calculados a todas as alturas, foi remetida para o Anexo B. Os valores de humidade relativa foram lidos pelo LiDAR, alguns metros acima do solo. O gradiente de temperatura e rotação em altura foram calculados para a diferença de temperatura e direção entre os 40 e os 100 metros *a.n.s.*

Tabela 2 - Sensibilidade das medições a variáveis ambientais

Altura a.n.s [m]	Variável independente	Média	Desvio Padrão	m da reta	Sensibilidade	R^2	Sensibilidade $\times R$
40	Temperatura	21,1	5,44	-0,01	-0,04	3×10^{-6}	-7×10^{-5}
100		21,8	5,4	0,12	0,64	6×10^{-4}	0,02
40	Gradiente de Temperatura	0,01	0,01	-35,62	-0,44	4×10^{-4}	-0,01
100		0,01	0,01	-128,44	-1,59	4×10^{-3}	-0,10
40	Rotação em Altura	0,10	0,94	-0,33	-0,31	2×10^{-4}	-4×10^{-3}
100		0,10	0,94	1,40	1,32	$2,5 \times 10^{-3}$	0,07
40	Humidade Relativa	55,2	19,7	0,01	0,18	7×10^{-5}	2×10^{-3}
100		55,2	19,7	0,09	1,81	5×10^{-3}	0,12
40	<i>Shear</i> <i>Factor</i>	0,20	0,24	4,58	1,11	3×10^{-3}	0,06
100		0,20	0,24	-5,23	-1,27	2×10^{-3}	-0,06
40	Intensidade de Turbulência	0,30	0,38	6,88	2,64	0,01	0,32
100		0,26	0,33	19,35	6,30	0,06	1,50

Através da análise dos valores da sensibilidade e do coeficiente de correlação, pode perceber-se que as medições do *Windcube*[®] são afetadas pela temperatura, gradiente de temperatura, pela rotação em altura e humidade relativa, *shear factor* e intensidade de turbulência.

Considerou-se, então, como simplificação e por este ser o único LiDAR com uma torre montada nas imediações, que estas variáveis ambientais também afetam as medições realizadas pelos outros dispositivos de medição remota instalados ao longo do terreno. Esta análise permitiu olhar de uma forma crítica para as medições realizadas pelos dispositivos de medição remota e distinguir entre valores causados por fenômenos mecânicos e/ou térmicos e valores causados por uma medição afetada por variáveis ambientais. Por não existirem torres de medição perto de todos os LiDARs (tal seria demasiado dispendioso e tornaria menos evidente o propósito dos dispositivos de medição remota), a influência destas variáveis ambientais foi tida em conta, mas não foi quantificada. Seria interessante perceber melhor de que forma estas variáveis influenciam as medições, eliminando para isso pontos que estivessem fora de algum intervalo pré-definido para cada uma delas. Por não ser o objetivo primário deste trabalho e pela restrição de tempo aplicada a qualquer projeto desta natureza, não foi possível realizar essa “filtragem”.

6.2 LiDAR Zephir® (112)

Este LiDAR foi montado no sopé exterior ao vale da colina Oeste. A topografia que envolve o local é algo complexa, com alguns declives acentuados e proeminências consideráveis. O corte Norte-Sul mostra um declive negativo para o vento que sopra de Norte para Sul, com uma protuberância a jusante do LiDAR. Nas outras direções, cujas imagens foram remetidas para o Anexo A, observam-se variações de declive, mas o terreno aparenta ser menos irregular do que na direção Norte-Sul.

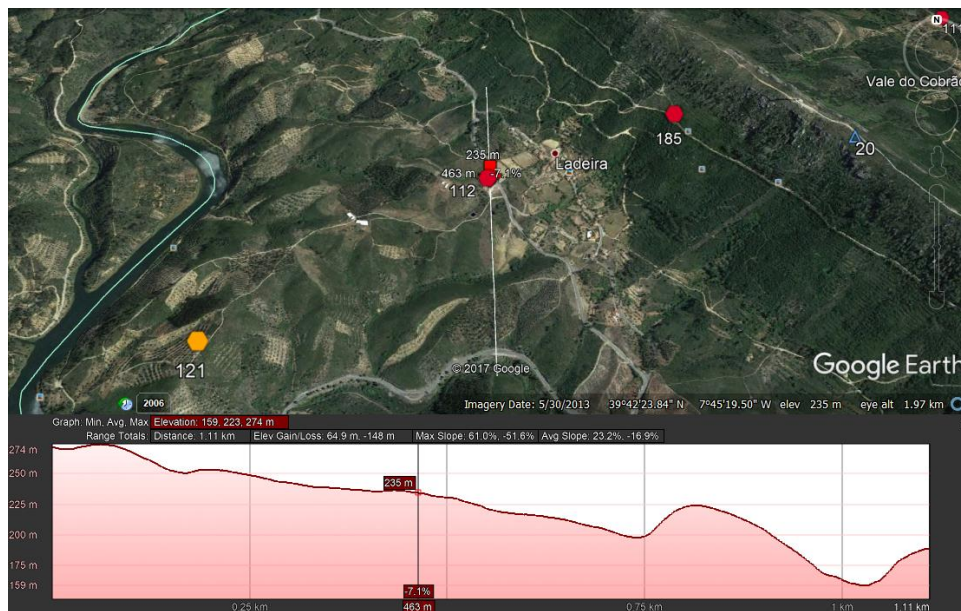


Figura 18 - Corte Norte-Sul Zephir 112

Se se analisar a inclinação do escoamento em função da direção do vento, pode ver-se que em média os maiores ângulos de escoamento ocorrem quando o vento sopra, sensivelmente, de cada um destes quadrantes sendo, assim, possível perceber melhor a topografia do terreno que rodeia o dispositivo.

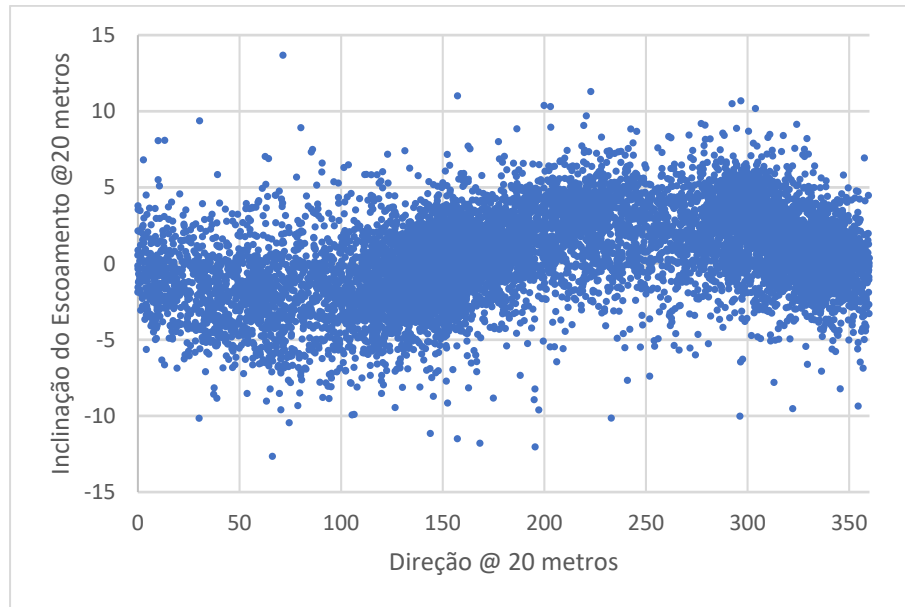


Figura 19 – Inclinação do escoamento a 20 metros versus a direção do vento a 20 metros (Zephir 112)

A inclinação para o primeiro quadrante (entre Norte e Este) é maioritariamente negativa e é causada pelo declive da colina, já que o vento que sopra dessa direção é obrigado a obter a inclinação do terreno e, pela sua inércia e viscosidade, não é imediata a diminuição da componente vertical da velocidade. O comportamento descrito na Figura 19 é observado para as outras alturas, como se mostra no Anexo C, apesar de ser menos claro com o aumento da altura, pelo que se conclui que os efeitos da topografia se “perde” com o afastamento ao solo. Menos afetado por fenómenos mecânicos, o escoamento a maiores alturas será mais influenciado por fenómenos térmicos que passarão a controlar a forma do escoamento.

Depois de filtrados pelos critérios atrás referidos, obtiveram-se 10843 médias de 10 minutos medidas pelo LiDAR 112. Todos os dados foram recolhidos entre 25 de janeiro de 2017, às 11h40, e 2 de julho de 2017, às 08h30.

As velocidades médias registadas durante este período estão visíveis na Tabela 3. Estas velocidades são independentes da direção e são apenas função da altura. Como seria de esperar, a média das velocidades é tanto maior quanto mais afastada do solo é o ponto de medição. São, todavia, velocidades

médias muito baixas, algo que se verifica na generalidade dos dados que foram disponibilizados, o que dificulta a análise das características do vento em diversas situações.

Tabela 3 - Velocidade Média às diferentes alturas lidas pelo Zephir 112

Altura [m]	200	180	160	140	120	100	80	60	40	20
Velocidade Média [m/s]	4,05	3,91	3,76	3,62	3,47	3,32	3,16	2,97	2,74	2,42

Uma medição da velocidade a diversas alturas, permite traçar o perfil de velocidades médio neste local de medição abrangido pelo LiDAR. Esse perfil encontra-se traçado na Figura 20, onde pode observar-se melhor o aumento da velocidade com o aumento da altura.

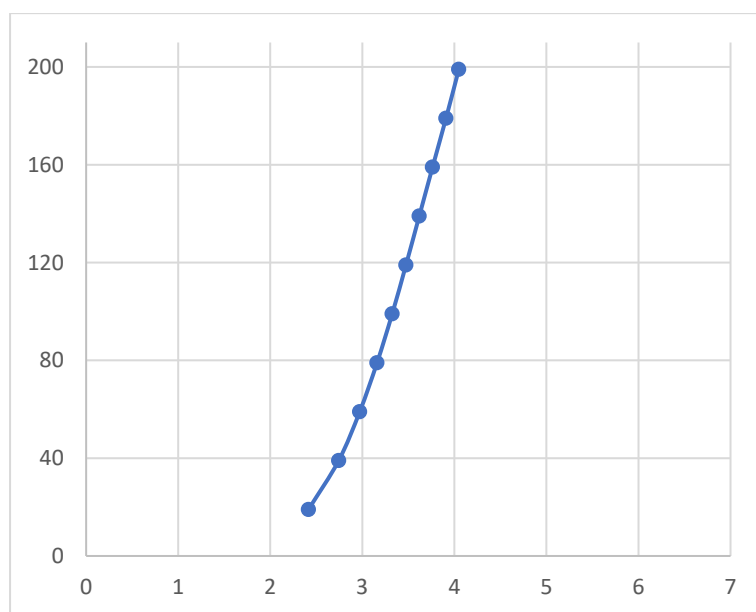


Figura 20 - Perfil de Velocidade Médio Zephir 112

Aplicando a Equação 17, calculou-se o *shear factor* associado ao perfil médio de velocidades:

$$\alpha = \log(4,05/2,42)/\log(200/20) = 0,22 \quad (17)$$

Resultados de múltiplas campanhas de medição levaram a que fosse possível a construção de uma tabela que associasse diferentes *shear factors* a diferentes tipos de terreno. Um *shear factor* de 0,22 está, normalmente, associado a um terreno arborizado com alguns edifícios [16], e já está fora do intervalo recomendado por grande parte dos fabricantes de aerogeradores ($0 \leq \alpha \leq 0,20$). Uma análise à zona onde

foi montado o LiDAR em estudo mostra que é uma zona com alguma vegetação e com algumas casas nas imediações. Apesar disso, prevê-se que não sejam apenas estes dois fatores os responsáveis pelo valor de *shear factor* calculado, e que a própria ondulação e complexidade topográfica do terreno influencie este parâmetro.

Para ter uma noção mais clara do efeito da topografia na variação da velocidade em altura, traçaram-se os perfis médios de velocidade para 16 direções diferentes, representados na Figura 21.

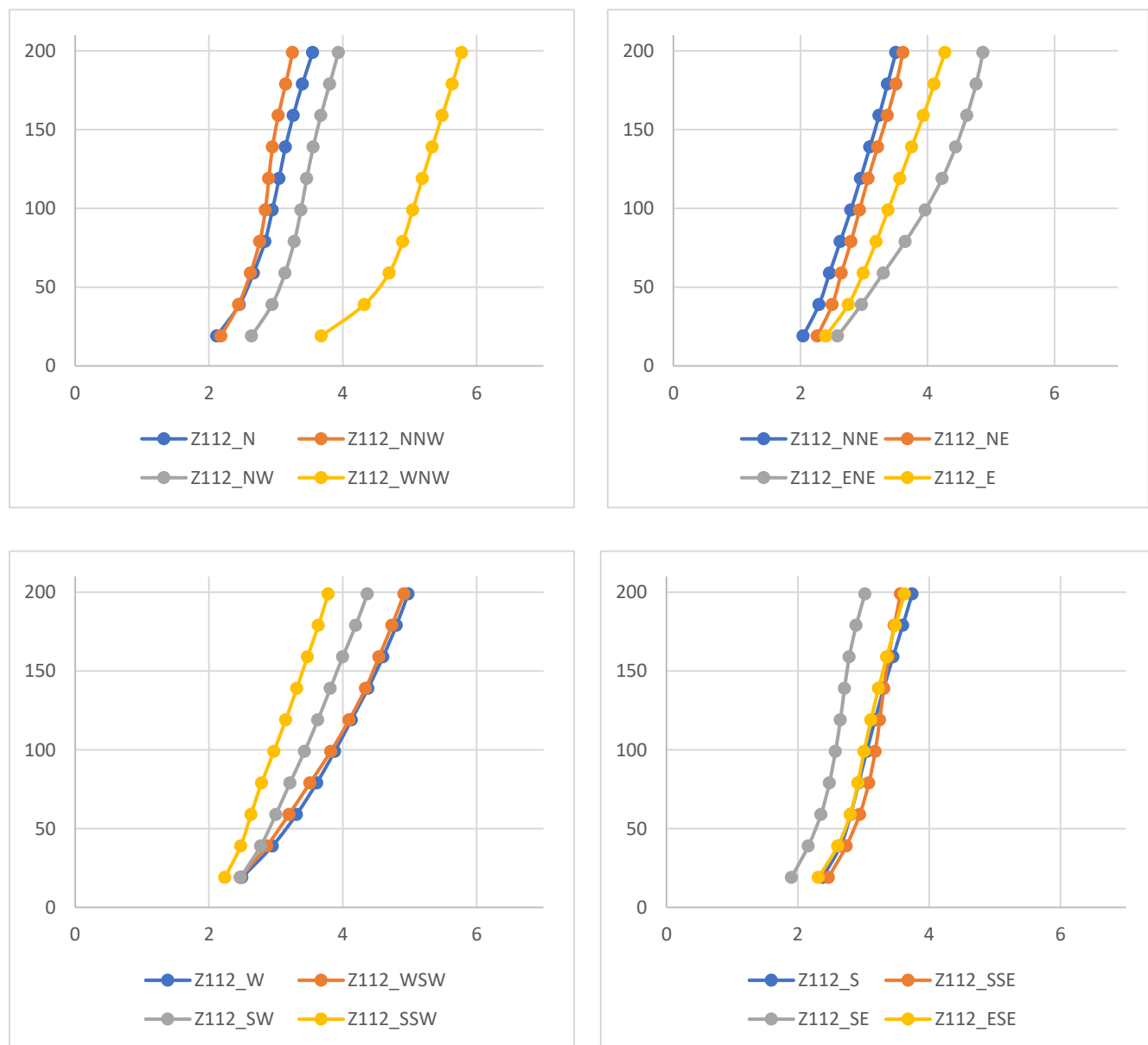


Figura 21 - Perfis de velocidade média para diferentes direções medidas @ 100 metros a.n.s.

O gráfico da Figura 22 mostra a quantidade de ocorrências que existem para cada uma das direções, para que se tenha em atenção quais os resultados que se baseiam em fenómenos que apresentam repetibilidade, e aqueles que acontecem esporadicamente, por razões pontuais. Traçou-se um gráfico que mostra o número de ocorrências a 100 metros *a.n.s.* para cada uma das 16 diferentes direções. A escolha da altura de 100 metros *a.n.s.* teve como base a possível comparação entre os vários aparelhos de medida instalados, já que esta é uma altura de medição para todos eles, e a possibilidade de analisar de forma mais crítica os perfis de velocidades atrás traçados, já que a sua direção foi medida a uma altura de 100 metros.

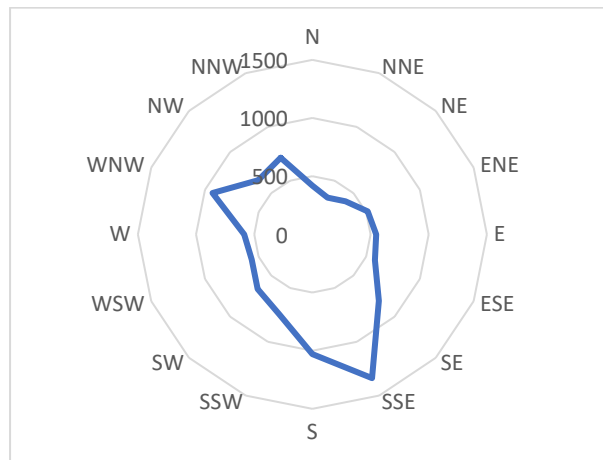


Figura 22 - Ocorrências a 100 metros *a.n.s.* registadas pelo Zephir 112

O número de ocorrências é máximo para Sul-Sudeste, a somar 1338 ocorrências (12%), sendo Norte-Nordeste a direção com apenas 341 ocorrências registadas (3%). Apesar do relativamente pequeno número de ocorrências para a direção Nor-Nordeste, 341 ocorrências permitem tirar ilações com algum nível de confiança.

Através de uma análise aos perfis da Figura 21, é possível observar que não variam muito quanto à sua forma, não sendo imediatamente aparente uma relação entre a forma do perfil e a direção de que sopra o vento. Uma análise mais cuidada, mostra que as velocidades máximas se verificam sempre à altura máxima de medição (200 metros *a.n.s.*), e os perfis aparentam ser mais abertos (diferença maior entre as velocidades às alturas máximas e mínima) para as direções do primeiro e terceiro quadrantes. No segundo quadrante, destaca-se o perfil de vento de WNW por, em média, o escoamento atingir velocidades maiores quando sopra dessa direção.

Outra forma de estudar os perfis de velocidade em função da direção é através da análise de um gráfico que relacione o *shear factor* com a direção do vento. A Figura 23 ilustra esse gráfico para o dispositivo de medição remota em causa.

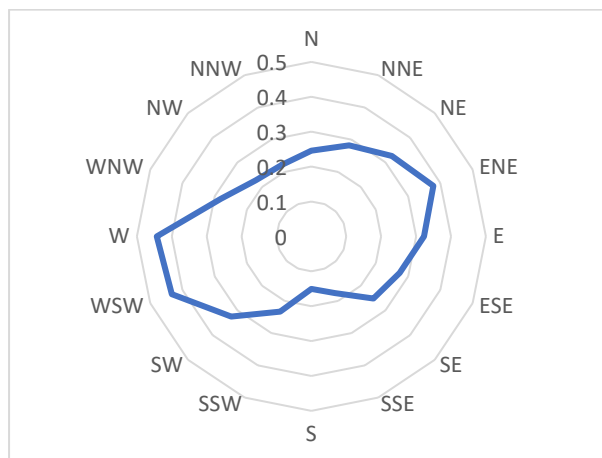


Figura 23 - *Shear factor* entre 20 e 200 metros a.n.s. em função da direção, Zephir 112

A análise do gráfico do *shear factor* versus a direção mostra o que já tinha sido constatado a partir dos perfis de velocidade: o primeiro e terceiro quadrantes apresentam um *shear factor* maior, com as restantes direções a apresentarem fatores bastante semelhantes entre si. Ainda se pode ler que o *shear factor* máximo é de 0,3, valor que já se encontra fora do intervalo que está associado a um terreno arborizado com alguns edifícios e entra agora no intervalo associado a terrenos característicos de pequenas urbanizações [16].

Estas diferenças podem não só estar associadas a fenómenos mecânicos causados pelo escoamento num terreno de topografia algo complexa e pela sua cobertura, mas também a fenómenos térmicos.

Para tentar perceber se e de que maneira a temperatura e, talvez mais relevante, o gradiente de temperatura afetam a forma do perfil de velocidades, dividiu-se a análise em perfis diurnos e noturnos, para além da divisão direcional. Como o anoitecer e o amanhecer se dão a horas diferentes ao longo do ano e como as medições englobam estações tão diferentes como o Inverno e o Verão, optou-se por utilizar um período que apenas englobe, garantidamente, horas diurnas ou horas noturnas. Escolheu-se, então, o período entre as 09h00 e as 16h00 como período diurno, e entre as 22h00 e as 05h00 como período noturno. A temperatura média diurna foi de 25°C, enquanto que a temperatura média noturna foi de 14°C.

As ocorrências em função das diferentes direções, para ambos os períodos, estão representadas na Figura 24.

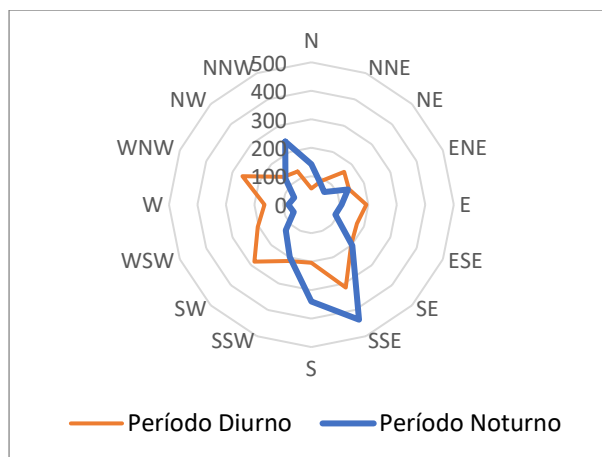


Figura 24 - Ocorrências em função da direção @ 100 metros a.n.s. (período diurno vs noturno)

Quer para o período diurno quer para o período noturno, continuam a verificar-se perfis mais abertos para ventos que sopram de direções do primeiro e terceiro quadrantes. Os perfis de velocidade diurnos do segundo quadrante apresentam velocidades elevadas e estão representados na Figura 25. A direção WNW é a direção sensivelmente paralela à cumeada e apresenta velocidades médias perto de 7 m/s a 200 metros a.n.s., com um *shear factor* aparentemente elevado. A ausência de relevo considerável nesta direção nada faz para acelerar o fluido junto ao solo, pelo que existe um gradiente de velocidade grande entre as duas alturas extremas.

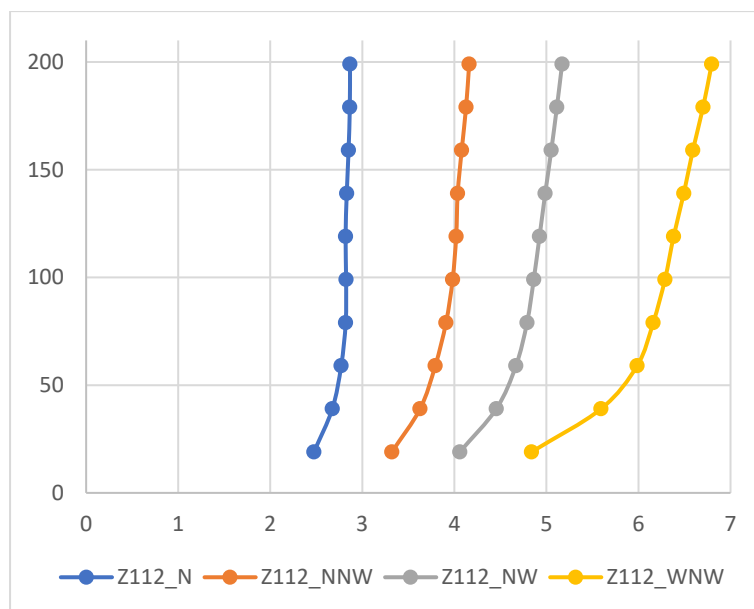


Figura 25 - Perfis de velocidade médios em função da direção @ 100 metros a.n.s. (período diurno - Zephir 112)

Para a direção ENE, direção sensivelmente perpendicular à cumeada, destaca-se um perfil de velocidades médias elevadas para o período noturno. Isto pode estar relacionado com a tendência que o escoamento possui de, durante o período noturno, descer as colinas (ventos catabáticos).

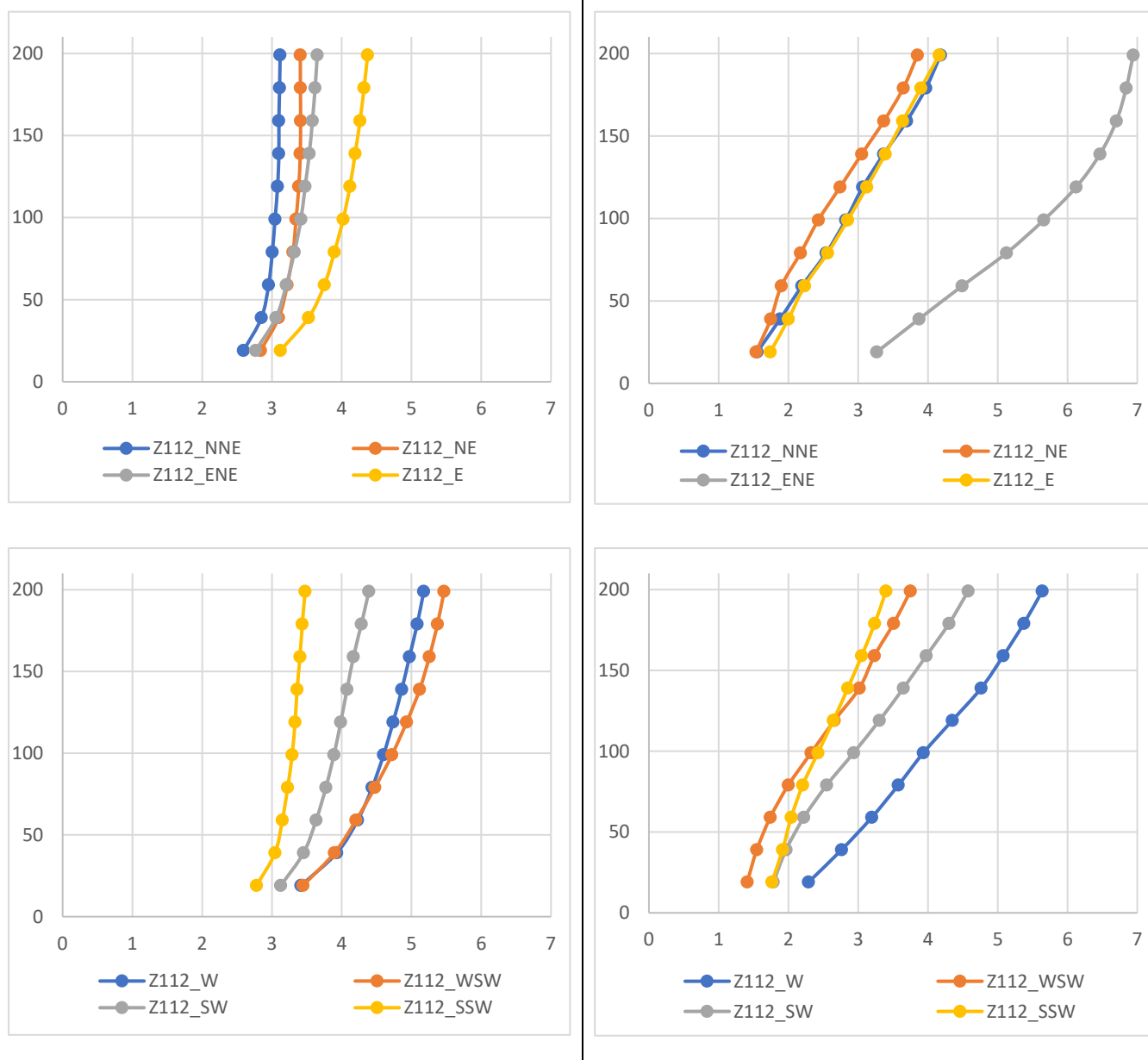


Figura 26 - Perfis verticais médios em função da direção @ 100 metros a.n.s. [Lado esquerdo - período diurno; Lado direito - período noturno]

No entanto, evidencia-se uma diferença entre estes dois períodos na forma e na velocidade média que apresentam. Durante o dia, a variação de velocidade em altura aparenta ser menor, ou seja, espera-se que os *shear factors* sejam menores para o período diurno. Apesar de a velocidade variar menos com o

aumento da altura de medição, as velocidades medidas são, em média, superiores durante o dia. A Tabela 4 apresenta as velocidades médias diurnas e noturnas para as diferentes alturas de medição.

Tabela 4 - Velocidade Média às diferentes alturas lidas pelo Zephir 112 durante o dia e a noite

Altura [m]	200	180	160	140	120	100	80	60	40	20
Velocidade Diurna [m/s]	4,31	4,26	4,20	4,14	4,08	4,01	3,92	3,80	3,61	3,25
Velocidade Noturna [m/s]	3,71	3,51	3,29	3,09	2,87	2,67	2,46	2,22	1,99	1,73

Uma análise aos perfis de velocidades médios traçados para os períodos diurno e noturno ilustra esta diferença de velocidade e de variação de velocidade em altura.

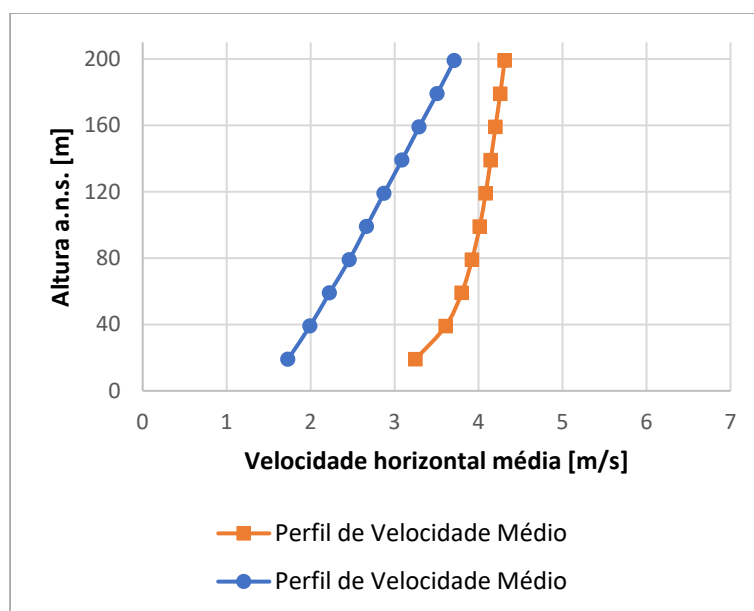


Figura 27 - Perfil de Velocidade Média Zephir 112 para os períodos diurno e noturno

A aplicação da Equação 5 para as alturas *a.n.s.* de 200 metros e 20 metros permite concluir que o *shear factor* médio diurno é de 0,12, enquanto que o noturno é de 0,33.

Será, mais uma vez, interessante saber quais os valores de *shear factor* associados às diferentes direções e, talvez mais importante, se essas direções são semelhantes para o período diurno e noturno. No entanto, para que se possam comparar os *shear factors* nos diversos pontos de medição ao longo da Serra, optou-se por traçar o *shear factor* calculado entre os 20 e os 100 metros *a.n.s.*. A Figura 28 mostra

que o período noturno está associado a valores de *shear factor* maiores para praticamente todas as direções, com a exceção das direções WNW e ESE. No entanto, como essas direções têm um baixo número de ocorrências associado, não é possível perceber se é um fenômeno com repetibilidade.

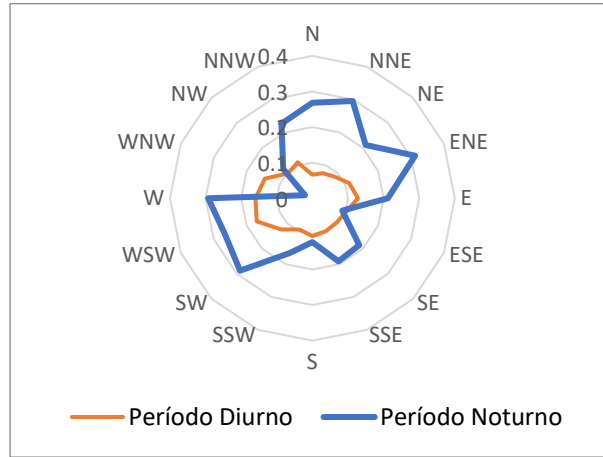


Figura 28 - *Shear factor* entre 20 e 100 metros a.n.s. em função da direção para os períodos diurno e noturno, Zephir 112

A superioridade do *shear factor* noturno poderá estar ligada às diferenças de temperatura entre o dia e a noite. Durante a noite, a ausência da radiação solar leva a um arrefecimento da superfície terrestre. Este arrefecimento cria uma pequena camada de ar estável perto do solo (camada limite), que por sua vez leva a uma inversão térmica do ar, ou seja, as camadas de ar mais afastadas do solo têm uma maior temperatura do que a camada junto ao chão. A estabilidade da superfície junto ao solo cria limitações no que toca à troca de calor, humidade e movimento entre as camadas mais afastadas do solo e a camada limite, que fica praticamente “desligada” do que ocorre a alturas superiores [17]. Assim, é possível ter ventos velozes fora da camada limite, e um escoamento calmo dentro desta camada, o que promove um aumento do *shear factor*.

Uma outra análise que pode ser feita envolve a rotação em altura. O bom funcionamento de uma turbina eólica está dependente de uma boa manutenção da direção do vento ao longo da extensão das pás. Rotações excessivas do escoamento (mais de 10°) podem pôr em causa a integridade mecânica da turbina e impossibilitar a conversão da energia do vento em energia elétrica. Para analisar este fenómeno, traçou-se um gráfico que relaciona a variação de direção do vento ao longo das alturas de medição com a direção do vento à altura de referência (100 metros). Utilizou-se a altura de 100 metros como altura de referência para que possa haver comparabilidade de resultados em análises futuras. A Figura 29 mostra o gráfico traçado, e é clara a rotação que existe no escoamento ao longo das alturas de medição.

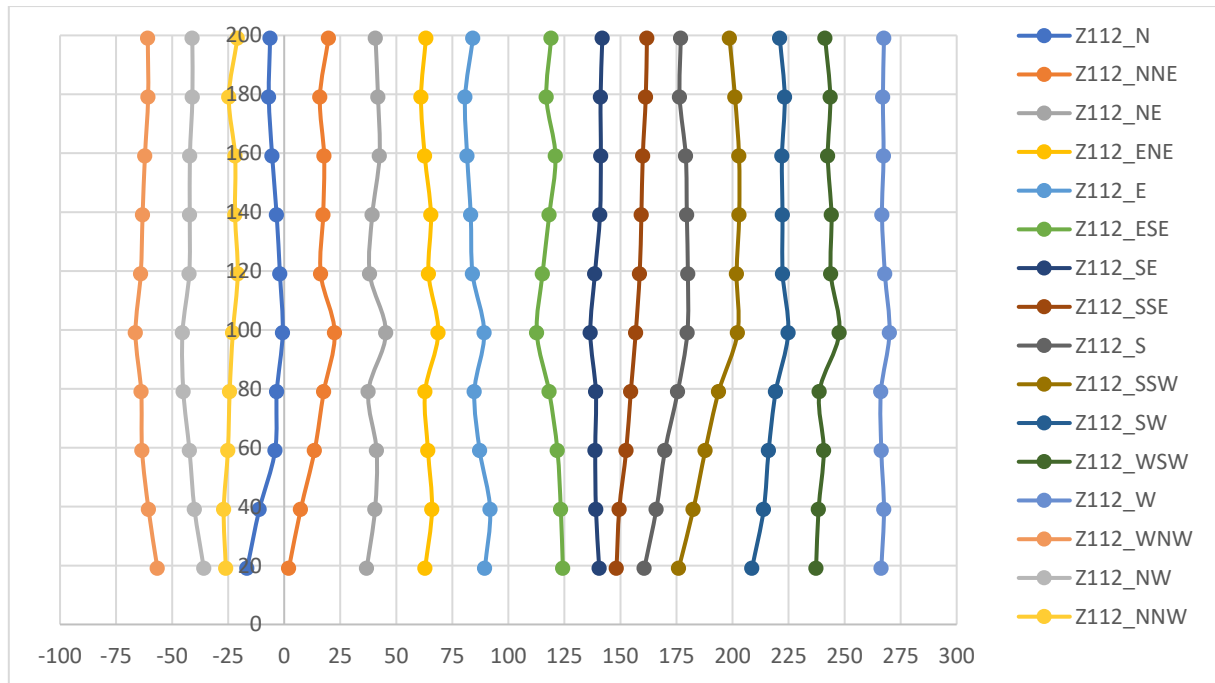


Figura 29 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros)

Através do estudo do gráfico da Figura 29 pode observar-se um ajuntamento do vento para as direções N, NNE, NNW, NW e WNW a partir dos 100 metros *a.n.s.*. O mesmo acontece para as direções ESSE, SE, SSE, S e SSW, o que indicia que estas mudanças de direção são causadas por irregularidades no terreno que forçam o fluido para uma direção específica. Uma análise do terreno que rodeia este aparelho de medida indicia que a posição relativa da colina e o pequeno relevo a SW do LiDAR “guiam” o escoamento para NNW quando o vento sopra do segundo quadrante e para SSE quando o vento sopra do terceiro quadrante.

Normalmente estes desvios ocorrem para velocidades baixas, de forma a que a quantidade de movimento e inércia do fluido não sejam grandes o suficiente para impedir esta mudança de direção. Para tentar perceber se a velocidade é um factor nesta mudança de direção, traçou-se o mesmo gráfico da Figura 29, mas utilizaram-se apenas as velocidades acima de 3 m/s, velocidade mínima do intervalo de *cut-in* para a maior parte das turbinas. Filtrar todas as velocidades menores que 3 m/s diminuiu o número de ocorrências para 3109.

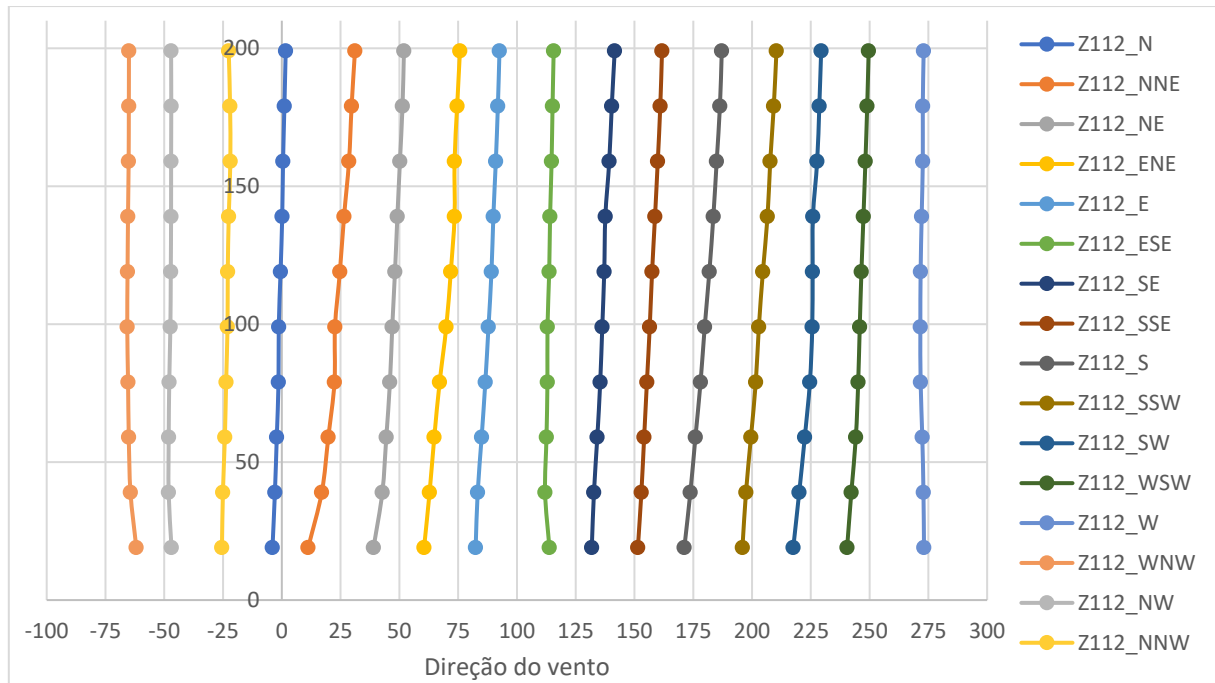


Figura 30 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros) s/ velocidades menores que 3 m/s

Esta filtragem reduziu algumas das variações encontradas anteriormente, pelo que se conclui que a rotação do escoamento em altura causada pela topografia do terreno será ampliada com a diminuição da velocidade do ar. No entanto, continua a existir uma rotação acentuada em altura, mas, desta feita, mais gradual e contínua. Estas rotações poderiam tornar dificilmente viável a instalação duma turbina eólica de grandes dimensões neste local. A rotação do escoamento na área varrida pelas pás de uma turbina de grande porte (dos 50 até aos 200 metros *a.n.s.*, por exemplo) poderia impossibilitar a produção durante muitas horas, inviabilizando, assim, um projeto. Ventos que sopram de ENE, NNE, S e SSW à altura de referência de 100 metros *a.n.s.* rodam, em média, mais de 10° entre os 200 e os 40 metros. O vento sopra destas direções 24% das ocorrências medidas e, por isso, estas rotações deveriam ser contabilizadas num estudo de viabilidade de um projeto eólico.

Para completar a análise ao local onde estava montado este aparelho de medição, procedeu-se ao estudo da I.T.. Como foi dito anteriormente, este parâmetro mostra a razão percentual entre o desvio padrão e a velocidade e permite comparar diferentes locais quanto à variação do vetor velocidade ao longo do tempo. A forma mais comum de analisar este parâmetro é através de um gráfico “intensidade de turbulência *versus* velocidade média”, como o representado na Figura 31.

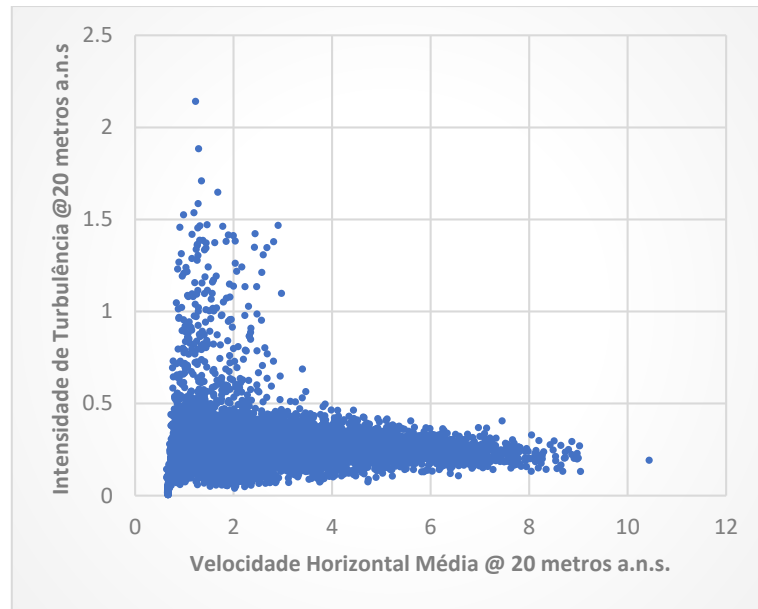


Figura 31 - Intensidade de Turbulência vs Velocidade Horizontal média a 20 metros a.n.s.

Apesar de ser possível encontrar valores de intensidade de turbulência superiores a 200%, isto só acontece para velocidades baixas e não terá grande significado no que toca ao aproveitamento eólico. Mais relevantes serão os valores destes parâmetros para velocidades superiores à velocidade de *cut-in*, que se considerou 3 m/s. Para estas velocidades, a intensidade de turbulência mantém-se praticamente sempre abaixo dos 50% e tende a diminuir com o aumento da velocidade, como se pode verificar na Figura 32. Este comportamento verifica-se para todas as alturas de medição, com a dispersão dos pontos a aumentar com o aumento da altura de medição. É, também, de salientar a forma do gráfico. Esta forma afasta-se daquela que seria a espectável, com grandes valores de intensidade de turbulência para baixas velocidades, com a uma rápida diminuição dessa intensidade com o aumento da velocidade horizontal, até chegar a um valor mais ou menos estável. Neste gráfico, a intensidade de turbulência diminui com a velocidade e estabiliza, mas parece não o fazer de forma gradual, como seria de esperar. Os valores de altas intensidades de turbulência são poucos, mesmo para baixas velocidades, e existem valores de intensidade de turbulência muito perto de 0, mesmo para velocidades baixas. Por estas razões, teve-se algum cuidado a tirar ilações acerca da intensidade de turbulência medida pelos dispositivos de medição remota.

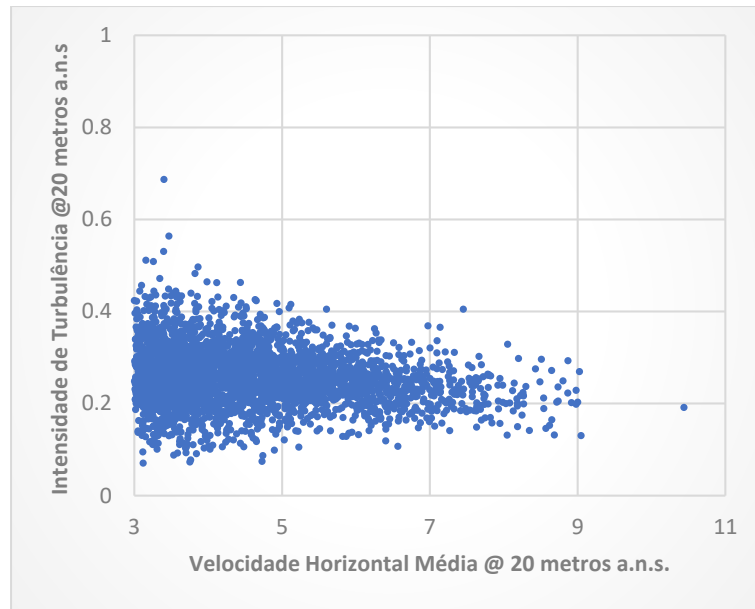


Figura 32 - Intensidade de Turbulência vs Velocidade Horizontal média a 19 metros *a.n.s.* (velocidades superiores a 3 m/s)

6.3 Estação de Medição n.º 20

A Estação de Medição n.º 20 foi instalada na colina Oeste e está posicionada cerca de 150 metros acima da posição do LiDAR 112. Esta torre estava equipada com oito anemómetros sónicos às alturas de 10, 20, 28, 37, 57, 78 e 100 metros *a.n.s.*. Dois anemómetros estão montados a 78 metros *a.n.s.*.

O terreno que envolve a torre é dominado por pequenos declives nas direcções paralelas à cumeeada (rumo NE-SW, sensivelmente) e declives acentuados nas restantes direcções. Uma análise topográfica do terreno envolvente pode ser consultada no Anexo A, com os cortes nas direcções dos principais pontos cardeais, e a Figura 33 mostra um corte Norte-Sul. De notar que a torre de medição não está montada no cume da colina, mas sim na sua encosta Oeste, perto do cume, com algumas elevações nas imediações. Esta localização poderá ter um efeito notável em vários parâmetros a analisar, como a inclinação do escoamento, a velocidade e o *shear factor*.

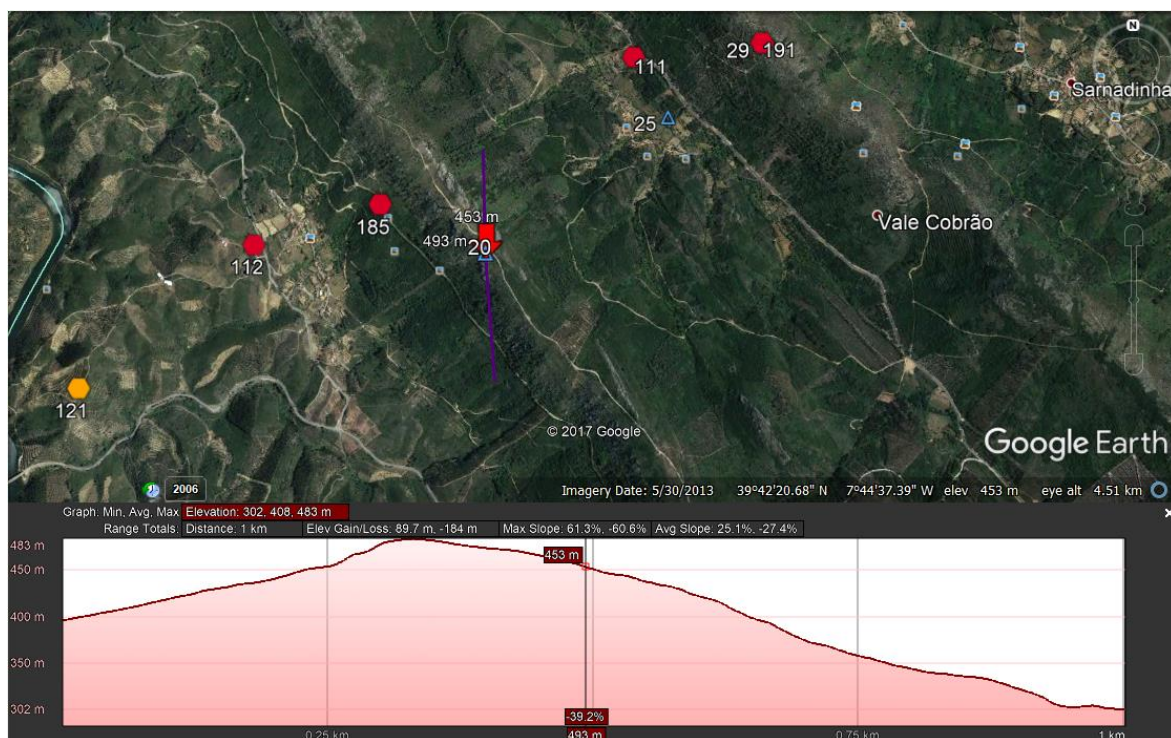


Figura 33 - Corte Norte-Sul Torre 20

Começou-se por analisar todos os dados recolhidos na torre, já depois de serem filtrados de acordo com os parâmetros explicitados anteriormente. O resultado foi um conjunto de 14333 pontos de medição, desde dia 7 de abril de 2017, às 13h50, até dia 26 de agosto de 2017, às 10h20.

Cada um desses pontos está associado a uma direção de vento. Para perceber quais as direções e rumos de vento predominantes, traçou-se um gráfico de ocorrências em função da direção do vento.

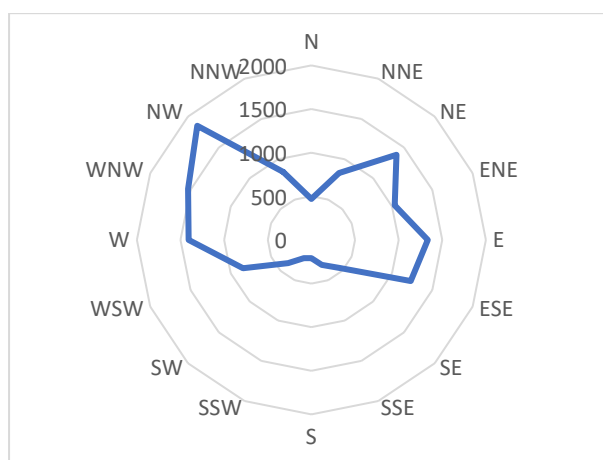


Figura 34 - Ocorrências a 100 metros a.n.s. registadas pela Torre 20

O maior número de registos deu-se para ventos de Noroeste, com 1850 registos (13% das ocorrências), com a o vento a soprar em menos ocasiões de Sul, com apenas 209 registos (1% das ocorrências). Esta diferença foi tida em conta aquando tiradas ilações.

Com os pontos medidos na torre, é possível traçar-se um gráfico que confronta a inclinação do escoamento a 10 metros *a.n.s.* com a direção do escoamento à mesma altura. Com isto, pretende-se perceber como se comporta o escoamento em redor do dispositivo de medição e, assim, tirar ilações quanto à influência da topografia e cobertura do terreno nesta zona. Analisando o gráfico da Figura 35 consegue perceber-se que o escoamento apresenta maioritariamente uma inclinação negativa quando o vento sopra do lado Este da colina. Entre os 80 e os 140° (ENE – SE), sensivelmente, a clareza desta inclinação é um pouco perdida, com bastantes ocorrências a mostrarem uma inclinação do escoamento positiva. Para estes ângulos, o escoamento tem de passar o cume da colina antes de chegar ao dispositivo de medição. A incapacidade de o fluido acompanhar a variação de declive do solo, já falada anteriormente, pode criar diferenciais de pressão capazes de levar à geração de zonas de recirculação após o cume. Estas zonas podem ser caracterizadas pela rotação do escoamento. Este fenómeno, por sua vez, pode originar leituras como as aqui observadas, que medem a inclinação do fluido positiva quando o declive do solo sugeriria uma inclinação negativa.

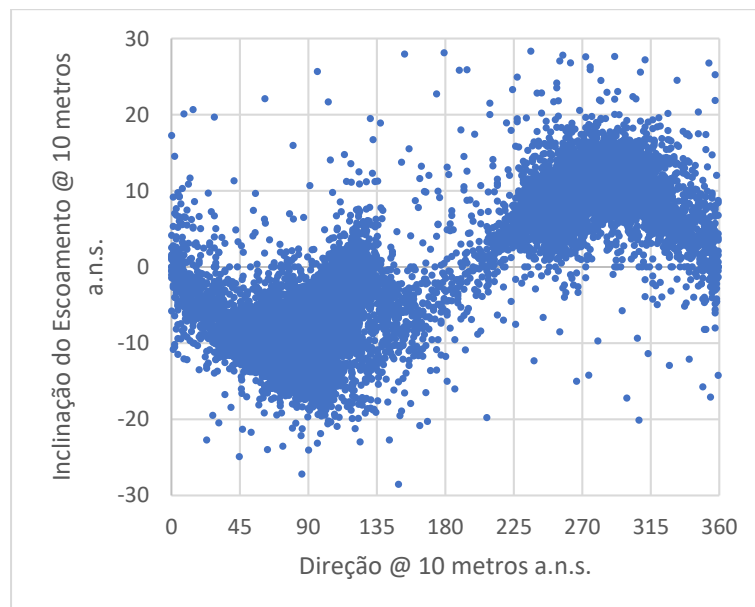


Figura 35 - Inclinação do escoamento a 10 metros *a.n.s.* versus direção do escoamento a 10 metros *a.n.s.* (Torre 20)

Segue-se uma zona com uma inclinação menos definida, entre os 140 e os 190°, sensivelmente, com o escoamento a ficar com inclinação positiva até aos 340°. Os ventos que sopram destas direções são

ventos que sobem a encosta, o que justifica esta inclinação. Entre os 340° e os 360° , pode observar-se uma indefinição da inclinação do escoamento, começando a ser negativa a partir daí.

Como dito anteriormente, o efeito da topografia é menos aparente nas camadas mais afastadas do solo, pelo que a alturas maiores não existe uma clara percepção do relevo do local, como se mostra na Figura 36.

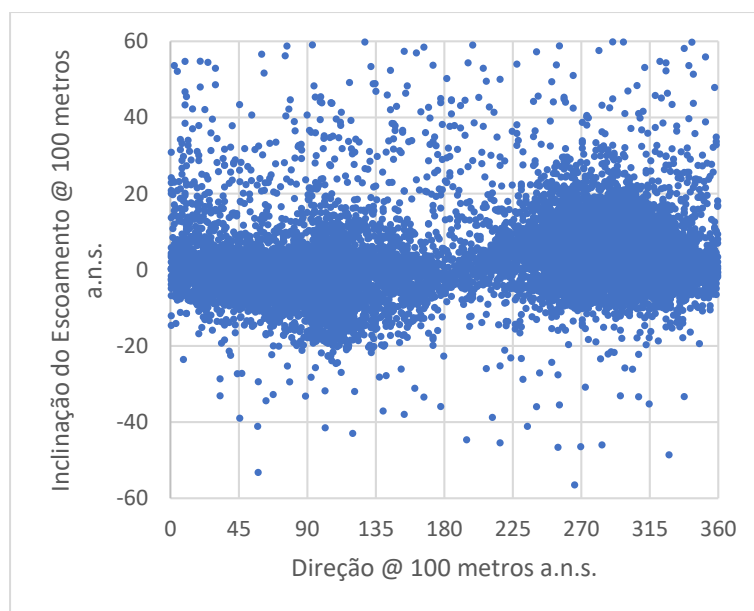


Figura 36 - Inclinação do escoamento a 100 metros a.n.s. versus direção do escoamento a 100 metros a.n.s. (Torre 20)

Traçou-se, posteriormente, o perfil de velocidades médio e independente da direção, ilustrado na Figura 37.

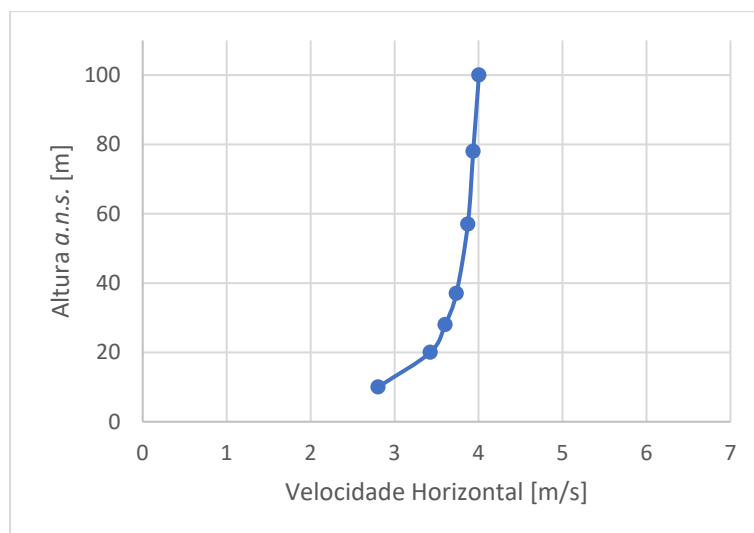


Figura 37 - Perfil de velocidade médio da Torre 20

O vento nesta zona possui, em média, uma velocidade entre 3 e 4 m/s , com a velocidade a variar mais acentuadamente entre os 10 e os 40 metros, diminuindo a variação da velocidade a partir dessa altura.

O *shear factor* médio, entre as alturas de 10 e 100 metros *a.n.s.* calculado através da Equação 5, é de 0,15, valor característico de um terreno com plantas rasteiras e pouca arborização [16].

Um perfil de velocidades médio esconde muita informação, pelo que se traçaram os perfis de velocidade médios para 16 direções diferentes, com a direção de referência a ser medida a 100 metros *a.n.s.*, representados na Figura 38.

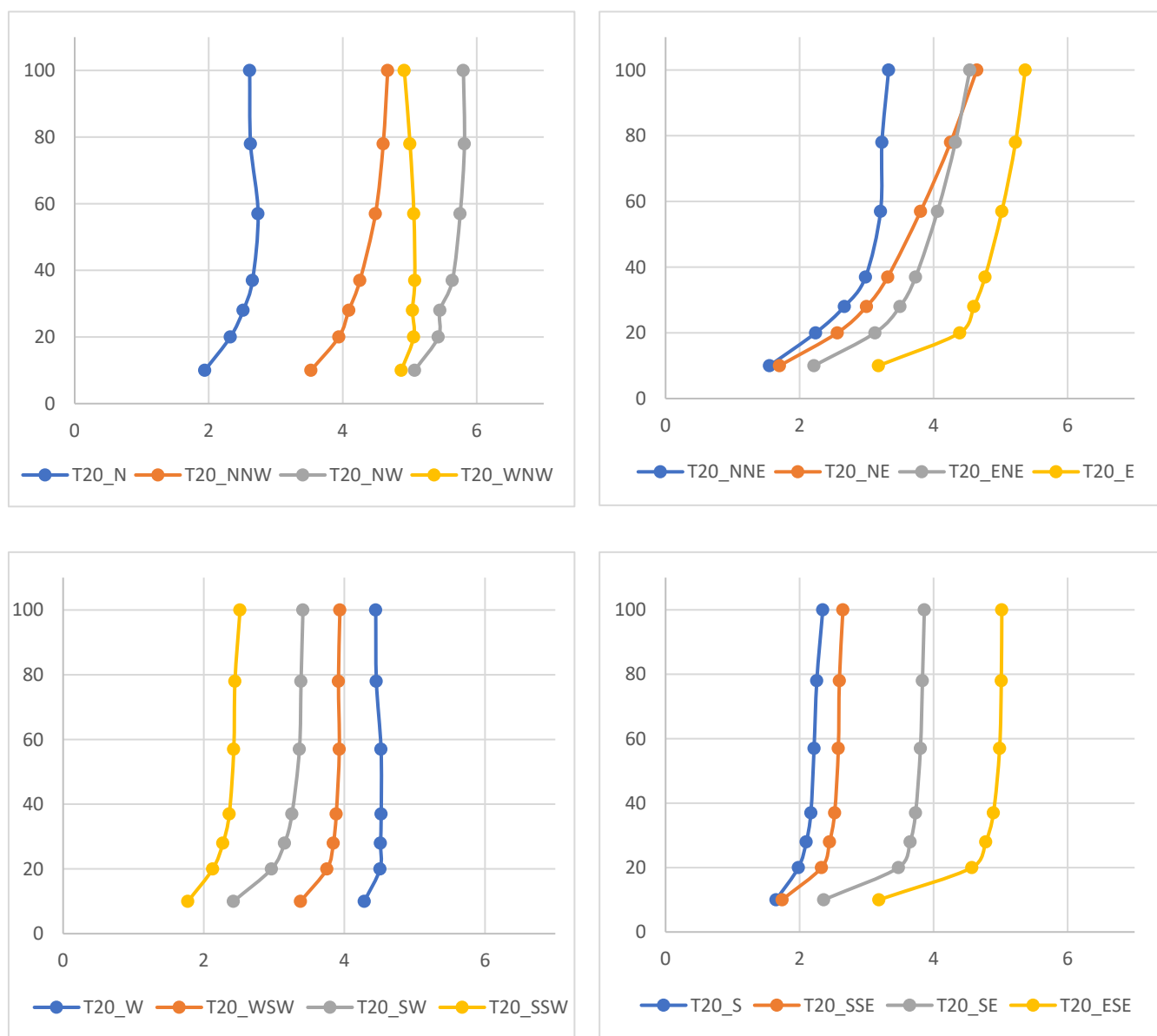


Figura 38 - Perfis de velocidade médios para as principais direções medidas @ 100 metros *a.n.s.* (Torre 20)

Pode observar-se que os perfis de cada quadrante apresentam uma variação de velocidade com a altura semelhante entre si, com a variação mais notável a ser a não a variação, mas a própria velocidade. Também é possível perceber que, em média, os perfis dos ventos que sopram do primeiro e do quarto quadrantes são mais abertos do que os dos restantes quadrantes. O vento que sopra destas direções, interage com os anemómetros sónicos instalados na torre depois de passar pelo cume da colina e iniciar o seu movimento de descida. Este deslocamento do escoamento, a variação da quantidade de movimento nas camadas mais junto ao solo na tentativa de acompanhar o seu declive e a incapacidade de o escoamento mudar instantaneamente de direção (pela sua viscosidade e inércia), leva a que seja mais notória uma variação da velocidade com o distanciamento ao chão, tornando o perfil mais “aberto”. Por outro lado, os ventos que sopram do lado Oeste da colina são obrigados a acelerar para que seja cumprido o princípio de conservação da massa. Esta aceleração junto ao solo, faz com que os perfis sejam mais verticais, dado que a velocidade a baixas alturas se aproxima muito mais das velocidades longe do solo.

O *shear factor* medido entre as alturas mínima e máxima e função da direção a 100 metros (Figura 39), mostra que os maiores valores se verificam para ventos provenientes do primeiro e quarto quadrantes, com o valor máximo para ventos que sopram de Nordeste (*shear factor* de 0,45). Esta é a direção praticamente perpendicular à cumeada, que obriga o escoamento a passar pelo cume da colina antes de atingir os dispositivos de medição. Uma análise ao gráfico do *shear factor* confere as conclusões tiradas pela observação dos perfis médios de velocidade: o *shear factor* é maior quando o vento sopra dos primeiro e quarto quadrantes, estando os perfis para as outras direções associados a valores mais baixos de *shear factor* (valores que rondam os 0,1).

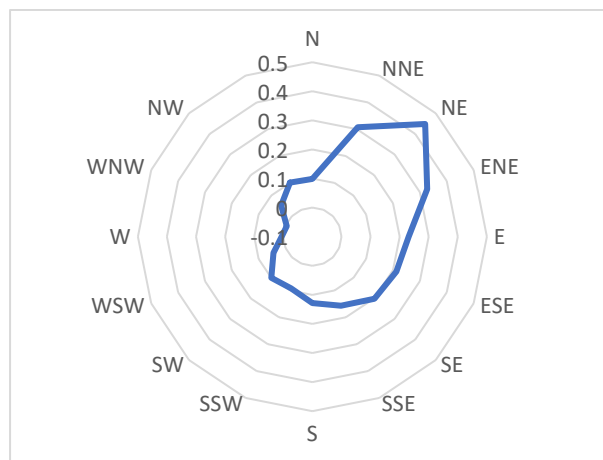


Figura 39 - *Shear factor* 10/100 versus direção a 100 metros a.n.s. – Torre 20

A clara relação entre o *shear factor* e a direção sugere que o escoamento neste local e as suas propriedades são largamente ditados pelo terreno envolvente, com fatores térmicos a ficarem em segundo plano.

A Figura 40 explicita essa mesma rotação para 16 direções diferentes. Em metade dessas direções, a rotação ultrapassa os 10°, com uma rotação média máxima de 35° para ventos que sopram de Norte.

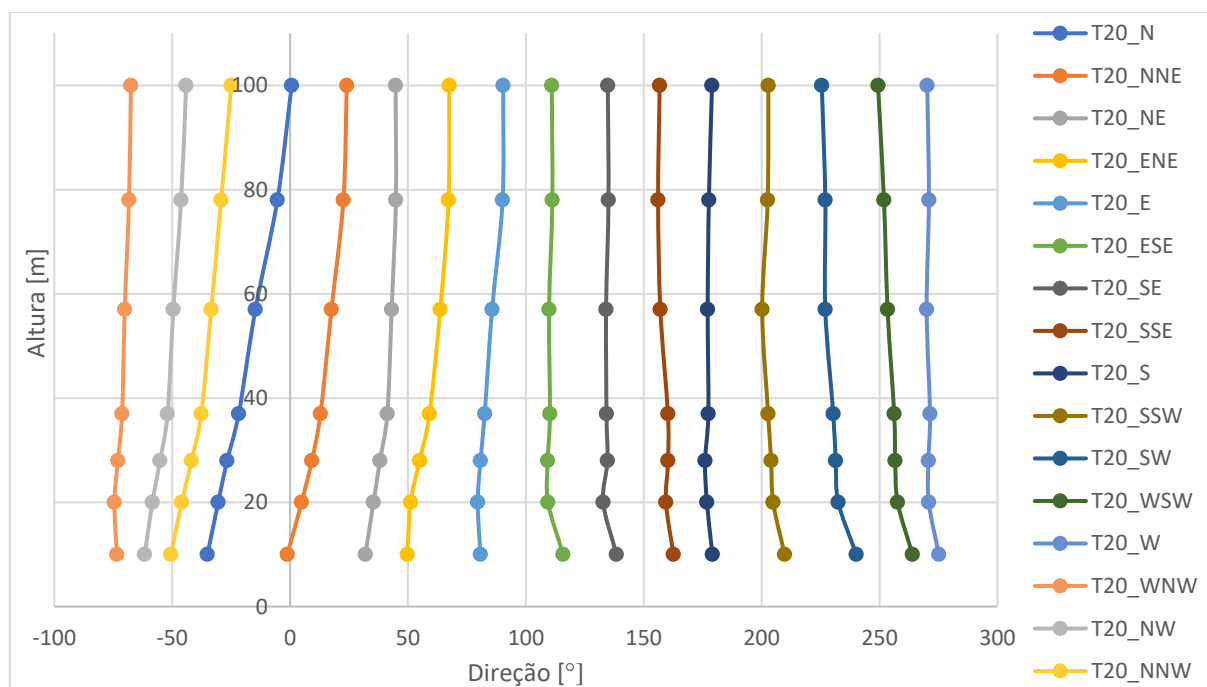


Figura 40 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros)

Para melhor visualizar a rotação em altura traçou-se um gráfico do tipo radar, onde se traçou o módulo da diferença entre as direções aos 10 e 100 metros de altura *a.n.s.* em função da direção a 100 metros de altura *a.n.s.*. O resultado é apresentado na Figura 41.

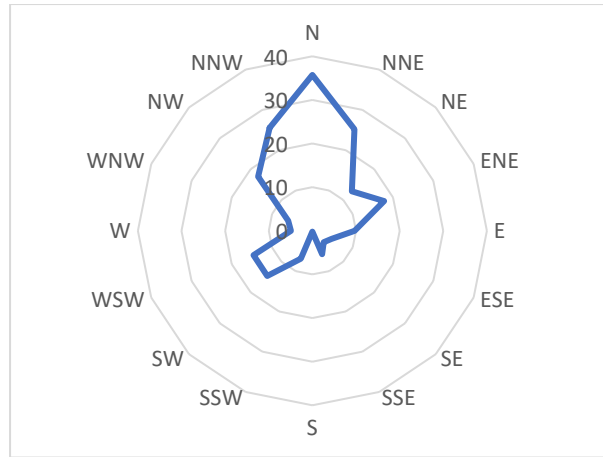


Figura 41 - Diferença de direção entre os 10 e os 100 metros a.n.s. em função da direção a 100 metros a.n.s.

A análise deste gráfico permite perceber que as maiores rotações se dão para ventos que sopram de Norte, e que existe alguma simetria nas rotações para as direções entre Oeste-Nordeste e Este-Nordeste. A direção Norte é uma direção oblíqua à colina, pelo que o vento junto ao solo deverá querer seguir a direção do declive do terreno, rodando. A posição da torre (na encosta Oeste da colina), faz com que esta rotação acentuada não seja sentida quando o vento sopra de Sul. Nas direções perpendiculares à colina, Sudoeste e Nordeste, sensivelmente, a rotação em altura apresenta valores semelhantes, sendo um pouco maior quando o vento sopra de Sudoeste.

A clara relação entre o escoamento atmosférico e a topografia do terreno que envolve a Torre 20, leva a crer que o efeito das variações térmicas não será determinante.

Uma análise da evolução da intensidade de turbulência com a velocidade horizontal do escoamento e com a variação da altura ao solo mostra, antes de mais, uma forma muito mais próxima do que seria espetável para um gráfico que compara estes parâmetros. Para velocidades baixas o valor da intensidade de turbulência ultrapassa a unidade e atinge, para a altura de 100 metros *a.n.s.*, o valor de 10 (1000%). Por serem para velocidades muito baixas, estes valores não têm muito significado. A intensidade de turbulência decresce com o aumento da velocidade horizontal, variando dentro de um intervalo cada vez mais pequeno. O que se torna aparenta é uma diminuição desse intervalo com a diminuição da distância ao solo, ou seja, a dispersão dos valores diminui com a diminuição da distância ao solo. Também o próprio valor da intensidade de turbulência diminui com a diminuição da altura ao solo. A 100 metros *a.n.s.*, a partir de 4 m/s, podem ainda ser encontrados valores de intensidade de turbulência superiores a 0,8. A 10 metros *a.n.s.*, o valor da intensidade de turbulência não passa os 0,5, a partir da

mesma velocidade. É de salientar a pouca quantidade de pontos acima da velocidade de 4 m/s, pelo que seria de interesse fazer o mesmo estudo para alturas de vento mais forte neste local.

Decidiu-se fazer a mesma análise que tinha sido previamente feita para o LiDAR: dividiram-se os dados em medições efetuadas durante o dia e medições efetuadas durante a noite. As horas utilizadas para separar estes dois períodos diários foram as mesmas utilizadas anteriormente.

As temperaturas médias registadas para os períodos diurno e noturno foram descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Temperaturas médias diurnas e noturnas medidas pela Torre 20

Altura [m]	10	20	28	37	57	78	100
Temp. Média Diurna [°C]	26,46	25,85	25,69	25,94	24,85	24,89	24,98
Temp. Média Noturna [°C]	21,65	21,19	22,04	22,28	21,37	21,76	22,11

Da análise da Tabela 5 pode concluir-se que tanto a temperatura como o gradiente de temperatura pouco variaram entre o dia e a noite, apresentando uma diferença média de 3,8°C entre os dois períodos. Não se esperam, por isso, diferenças drásticas no escoamento dos dois períodos.

No que toca a ocorrências, apesar de terem em comum o facto de serem muito menos frequentes ventos provenientes de direções do terceiro ou quarto quadrantes, apresentam algumas diferenças. A principal diferença está no número de ocorrências de Nordeste que domina o vento noturno e é muito menos representativo da direção de que sopra o vento durante o dia que, por sua vez, destaca os ventos que sopram do segundo quadrante. Essas diferenças podem ser verificadas na Figura 42 e devem ser tidas em conta quando analisadas as diferentes entre os escoamentos durante os dois períodos de medição.

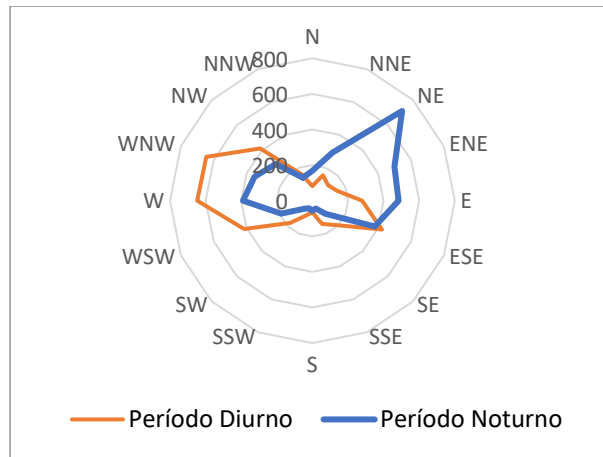


Figura 42 - Ocorrências a 100 metros durante o período diurno e noturno

Não aparenta existir grandes variações no que toca a variações de *shear factor* com a mudança entre dia e noite. A grande diferença entre os dois esquemas de *shear factor* função da direção encontra-se para ventos que sopram do terceiro e quarto quadrantes que, como dito anteriormente, constituem uma percentagem pequena das ocorrências totais. Por essa razão, ambos os gráficos aparentam ser semelhantes ao da Figura 39, que abrange todas as horas do dia.

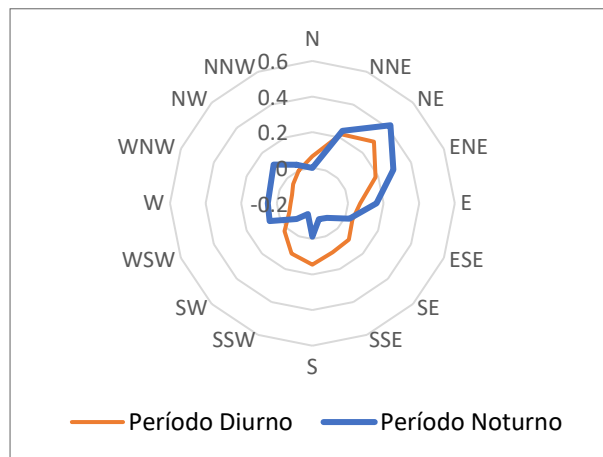


Figura 43 - Shear factor entre 10 e 100 metros a.n.s. em função da direção para os períodos diurno e noturno, Torre 20

Na Figura 44, pode observar-se a diferença entre as direções a 10 e as 100 metros acima do nível do solo em função da direção a 100 metros a.n.s.. Apesar de, para ambos os períodos, a rotação do escoamento ser máxima quando o vento sopra de Norte, o baixo número de ocorrências para esta direção durante o período noturno, não permite uma análise com um elevado nível de certeza. O mesmo se verifica para os dados do terceiro e quarto quadrantes. Se se comparar a rotação do escoamento com os perfis verticais médios para cada uma das direções, observa-se uma relação entre os parâmetros rotação e velocidade horizontal média, com a rotação a ser maior para escoamentos de mais baixa velocidade.

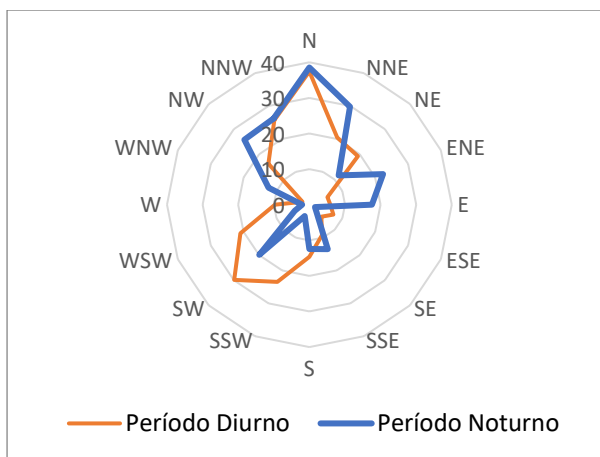


Figura 44 - Diferença entre a direção do escoamento a 10 e a 100 metros a.n.s. em função da direção @ 100 metros a.n.s. (Torre 20)

A análise dos gráficos da intensidade de turbulência em função da velocidade horizontal, permite perceber que existe um aumento da intensidade de turbulência e uma diminuição da dispersão dos pontos com a aproximação ao solo, algo que é comum aos dois períodos selecionados. É de notar, no entanto, como se pode observar na Figura 45, uma maior intensidade de turbulência registada durante o período diurno. Isto deverá estar relacionado com a maior estabilidade atmosférica do escoamento durante o período noturno.

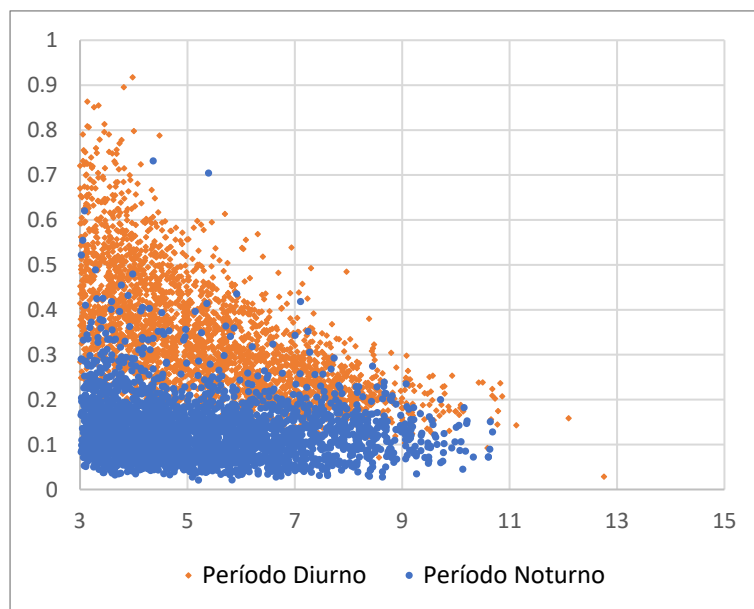


Figura 45 - Intensidade de turbulência @ 100 metros a.n.s. (Período diurno versus período noturno)

6.4 LiDAR Zephir® (111)

Este LiDAR foi instalado no vale, nas imediações do sopé colina Este. Esta localização em específico está rodeada por pequenas elevações, ou seja, o aparelho de medição remota está instalado numa espécie de “cratera”, com a colina a Nordeste.

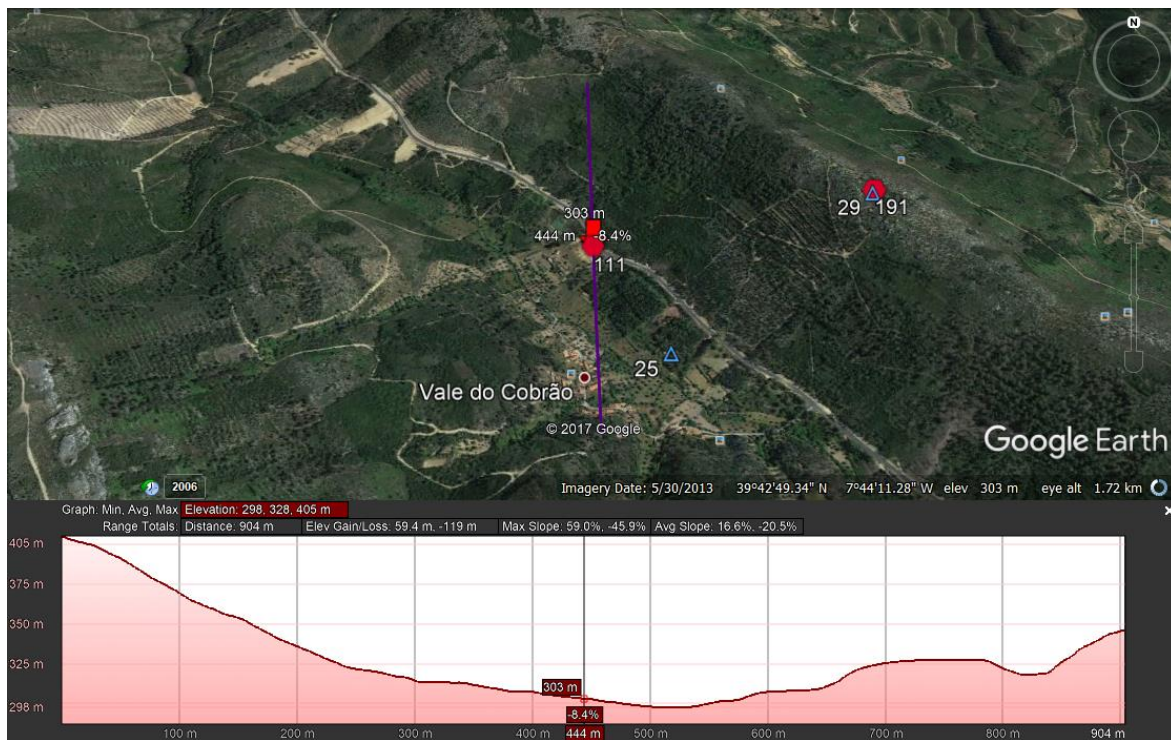


Figura 46 - Corte Norte-Sul (Zephir 111)

Depois de aplicada a filtragem mencionada atrás, ficou-se com um conjunto de 9785 pontos, desde dia 23 de janeiro de 2017, às 11h50, até dia 2 de julho de 2017, às 08h40.

A distribuição destes pontos pelas diferentes direções a 100 metros *a.n.s.* é mostrada na Figura 47. É possível observar um número máximos de ocorrências para a direção Noroeste (sensivelmente paralela à cumeada) com 1178 pontos medidos. O segundo quadrante é o quadrante que mais ocorrências tem, contando com 38% dos registos. Cada um dos outros três quadrantes conta com cerca de 20% das ocorrências. O número mínimo de registos deu-se para a direção ENE, que tem apenas 374 pontos. Esta discrepância em número de ocorrências deverá ser tomada em conta na análise dos dados recolhidos por este aparelho, caso essa análise seja sensível à direção do vento.

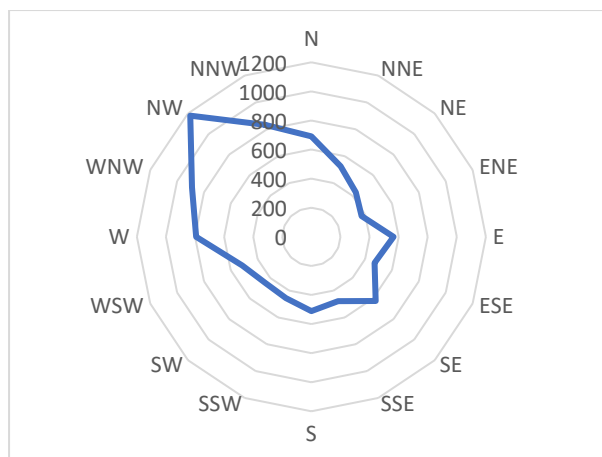


Figura 47 - Ocorrências a 100 metros a.n.s. registradas pelo Zephir 111

A complexidade do terreno que envolve este aparelho de medição, com pequenas elevações a rodearem praticamente todo o LiDAR, é aparente num gráfico que relaciona a inclinação do escoamento com a direção do vento, como o da Figura 48.

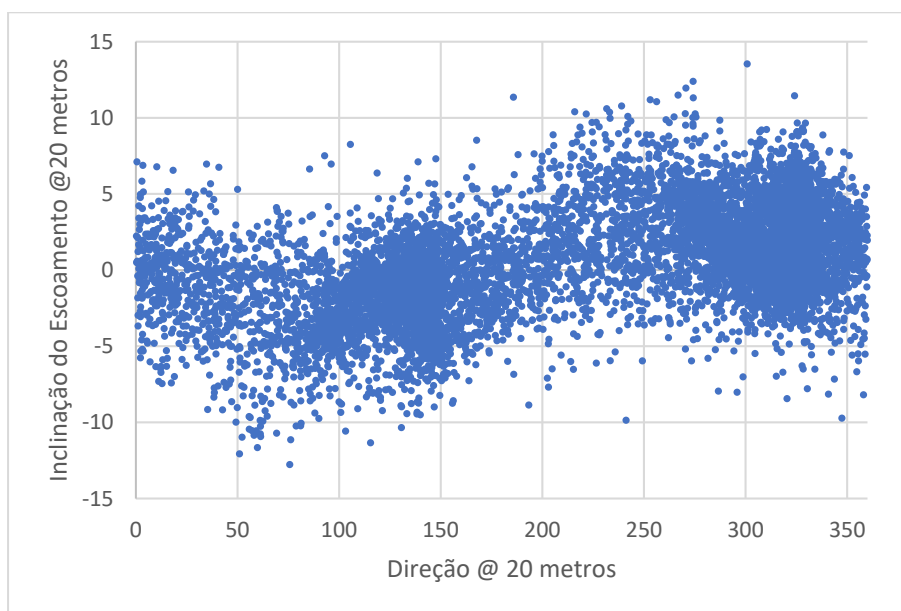


Figura 48 - Inclinação do escoamento a 20 metros versus a direção do vento a 20 metros (Zephir 111)

Traçando o perfil de velocidades médio para este período, obtém-se um perfil que pode ser caracterizado por velocidades médias baixas, nunca maiores do que 4 m/s , e uma variação de velocidade em altura aproximadamente linear (Figura 49). O *shear factor* para este perfil é de 0,27, um valor associado a escoamentos em pequenas cidades. É, assim, aparente que o perfil de vento é afetado por todas as protuberâncias que envolvem o dispositivo de medição.

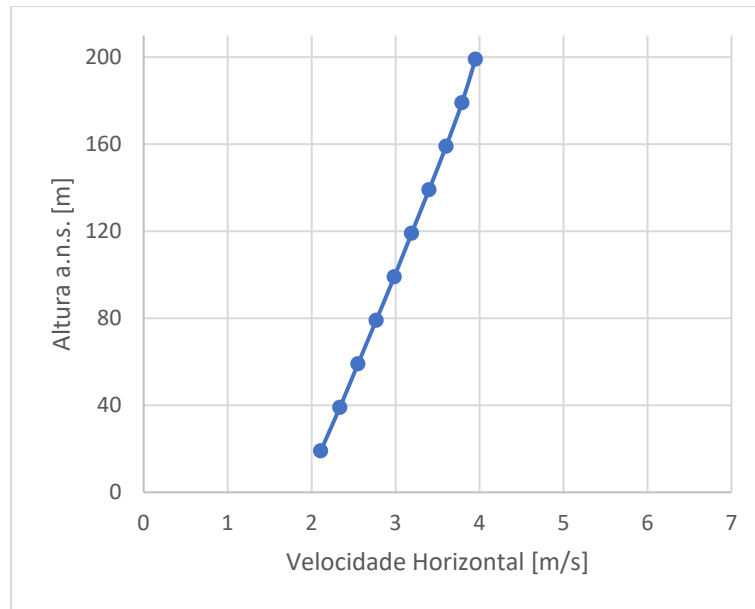


Figura 49 - Perfil médio de velocidades - Zephir 111

Para se perceber melhor de que forma esta relação se dá, traçaram-se os perfis para as 16 diferentes direções utilizadas anteriormente.

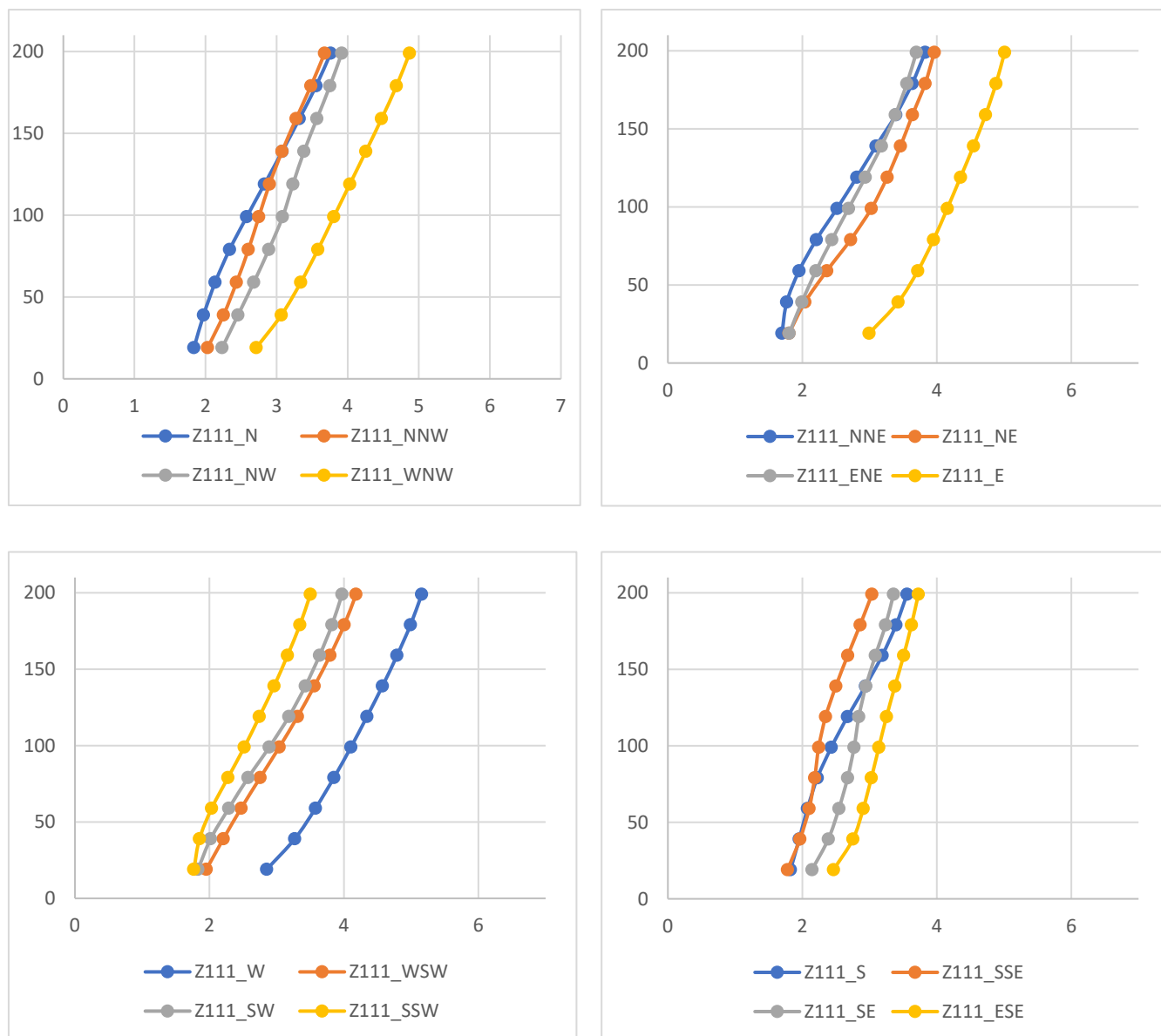


Figura 50 - Perfis de velocidade médios para as principais direções medidas @ 100 metros a.n.s. (Zephir 111)

É possível observar algumas direções predominantes no que toca à velocidade do escoamento, mas a maior parte das direções apresentam uma forma semelhante entre si. É de notar as baixas velocidades médias que se fazem sentir em praticamente todas as direções, com o escoamento a mover-se a mais de 4 m/s apenas para direções particulares ou para alturas elevadas.

Para uma melhor visualização das diferenças entre os perfis associados a diferentes alturas, traçou-se o gráfico que relaciona o valor de *shear factor* medido entre os 20 e os 200 metros a.n.s. com a direção do vento a 100 metros a.n.s., representado na Figura 51.

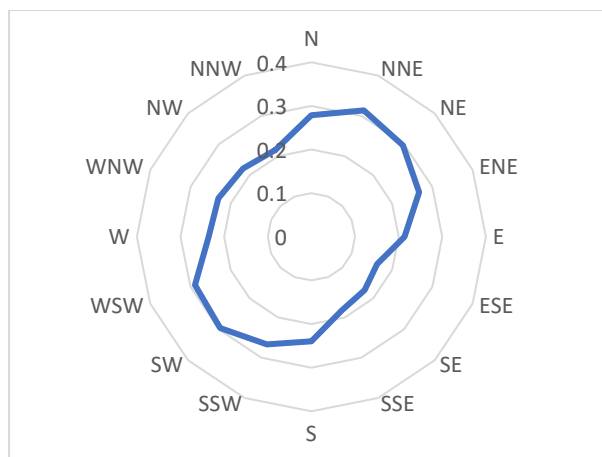


Figura 51 - Shear Factor 20/200 versus direção (Zephir 111)

O *shear factor* parece ser relativamente homogêneo e quase independente da direção, com as direções perpendiculares à cumeada (NNE, NE, SW e SSW) a estarem associadas a um fator um pouco superior. A associação de baixas velocidades com uma topografia idêntica a todo o redor do aparelho de medição remota pela sua instalação num ponto baixo relativamente ao terreno envolvente, leva a que o escoamento se comporte de forma idêntica, independentemente do rumo que toma.

Uma análise da rotação em altura, na Figura 52, permite perceber que quando o vento sopra do segundo e quarto quadrantes, tende a rodar para uma direção específica. O vento que sopra do segundo quadrante a 100 metros *a.n.s.*, aparenta ter uma tendência a rodar para Noroeste, enquanto que o vento que sopra à mesma altura, mas do quarto quadrante, tende a rodar para Sudeste.

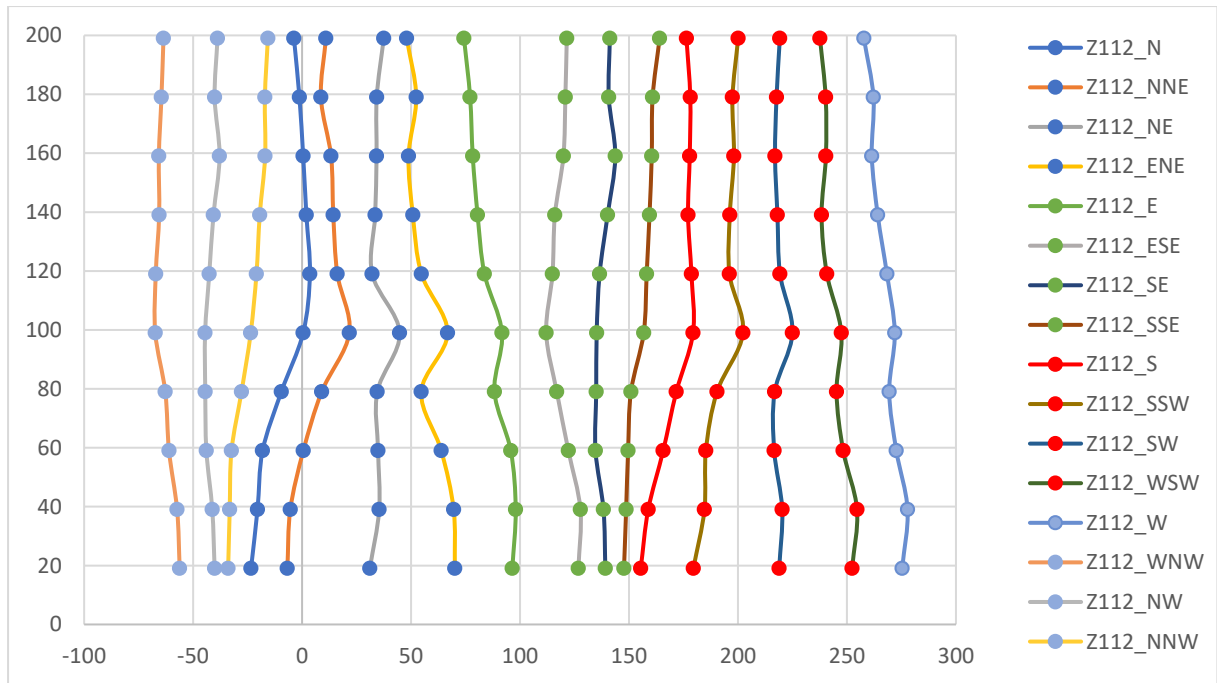


Figura 52 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros, Zephir 111)

Esta “aglomeração” do escoamento estará intrinsicamente ligada ao relevo que envolve o LiDAR, bem como à relativamente baixa inércia que está associada a um escoamento de baixa velocidade. A influência da quantidade de movimento na rotação deste escoamento pode ser observada traçando um gráfico que relaciona a diferença entre as direções a 100 e a 20 metros *a.n.s.* em função da direção do escoamento a 100 metros *a.n.s.*. Estas alturas foram escolhidas por ser a partir dos 100 metros de altura que se verifica uma rotação mais acentuada, e para que possa haver uma comparação entre as medições das torres e dos LiDARs. A Figura 53 mostra esse gráfico.

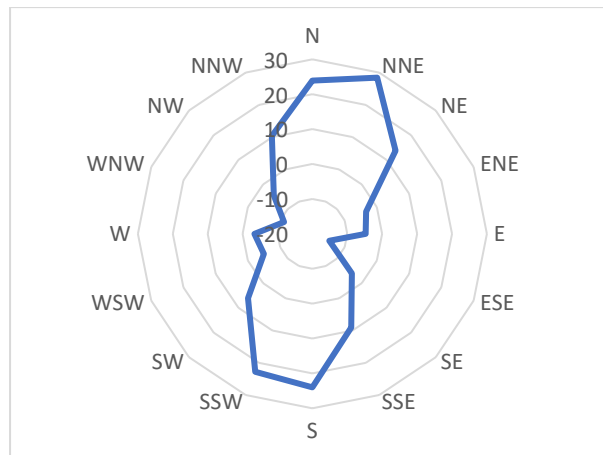


Figura 53 - Rotação entre os 100 e os 20 metros *a.n.s.* em função da direção a 100 metros *a.n.s.* (Zephir 111)

Por comparação com a Figura 50, pode observar-se que as menores rotações ocorrem para as direções de onde o vento sopra com mais velocidade. As maiores rotações acontecem para direções de ventos que sopram com menos intensidade.

De forma a caracterizar a turbulência neste local, traçou-se um gráfico que relaciona a intensidade de turbulência com a velocidade horizontal do escoamento. Esse gráfico para a altura de 20 metros *a.n.s.* está explicito na Figura 54. Como já foi dito anteriormente, na análise da intensidade de turbulência lida pelo LiDAR 112, estes gráficos afastam-se do esperado. No entanto, é possível observar que com o aumento da distância ao solo, a intensidade de turbulência parece dispersar, aumentando, para a mesma velocidade horizontal, o intervalo de valores tomados pela intensidade de turbulência. Também a intensidade de turbulência média varia com o afastamento ao solo. A 20 metros do solo, este parâmetro toma valores entre 0,2 e 0,4 para velocidades acima de 3 *m/s*, enquanto que, a 200 metros do solo, estes valores oscilam entre valores praticamente nulos e 0,3. Esta tendência de aumento da intensidade de turbulência e diminuição da dispersão deste valor verifica-se à medida que se diminui a altura acima do nível do solo.

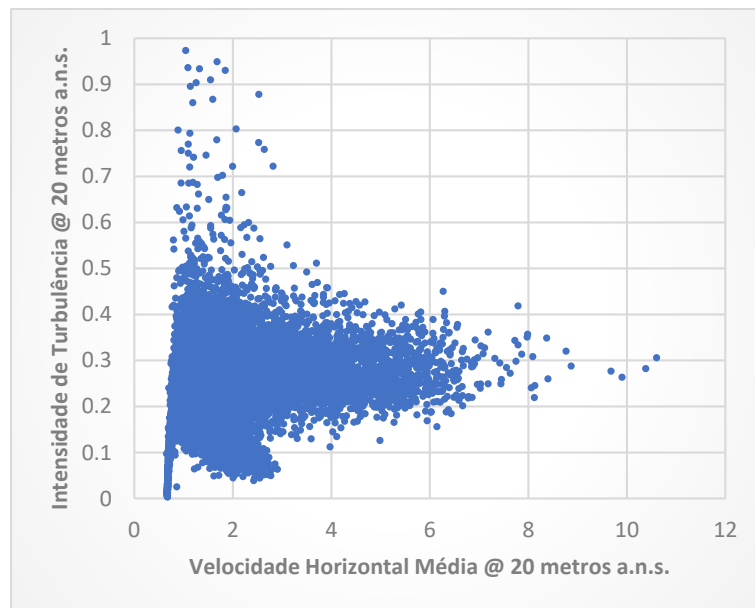


Figura 54 - Intensidade de Turbulência versus Velocidade Horizontal @ 20 metros a.n.s.

Pode-se agora, na tentativa de perceber de que forma os ciclos térmicos característicos do dia e da noite afetam a estabilidade atmosférica e, consequentemente, os parâmetros caracterizadores do escoamento, dividir as medições em diurnas e noturnas. Para isso, utilizaram-se as medições recolhidas entre as 9h00

e as 16h00 como horas diurnas, e as medições entre as 22h00 e as 05h00 como horas noturnas. A utilização destes períodos garante que, independentemente do mês de medição, o período diurno englobará as horas mais quentes do dia e apenas horas diurnas, e o período noturno englobará apenas horas noturnas e de temperatura que se esperam mais baixas.

Para o período diurno utilizado, obtiveram-se 2192 médias de 10 minutos. Para o período noturno, obtiveram-se 3063 pontos. Estas ocorrências dividiram-se por diferentes direções, como mostra a Figura 55, tendo sido predominantes as direções paralelas à cumeada, com o vento a soprar maioritariamente de Noroeste, semelhante às ocorrências sem restrições às horas do dia. Parece, também, existir uma tendência para o vento soprar mais de direções mais próximas de Norte e de Sul durante a noite, e mais de Oeste e Este durante o dia.

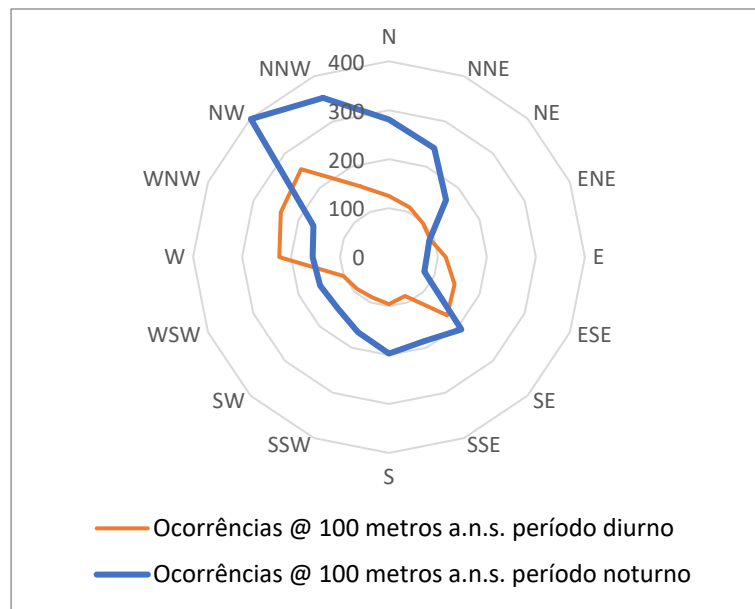


Figura 55 - Ocorrências @ 100 metros a.n.s. (Período diurno e noturno - Zephir 111)

Como foi visto anteriormente, espera-se um perfil de velocidades mais “vertical” durante o período diurno, pela instabilidade atmosférica uniformizar a velocidade às diferentes alturas. Uma análise ao perfil médio diurno e independente de direção mostra um perfil pouco aberto, com um *shear factor* calculado entre as alturas extremas (20 e 200 metros a.n.s.) de 0,14. Apesar de, a 200 metros a.n.s., a velocidade média do escoamento ser idêntica em ambos os períodos, a forma como essa velocidade evolui com o afastamento do solo é bastante diferente. Pela estabilidade do escoamento a baixas alturas, a variação de velocidade nos primeiros metros acima do solo é mais reduzida. No entanto, com o afastamento da camada limite, essa variação é amplificada e torna-se maior do que no período diurno.

Assim, o perfil de velocidades médio noturno tem associado um *shear factor* de 0,34 entre os 20 e os 200 metros *a.n.s.*.

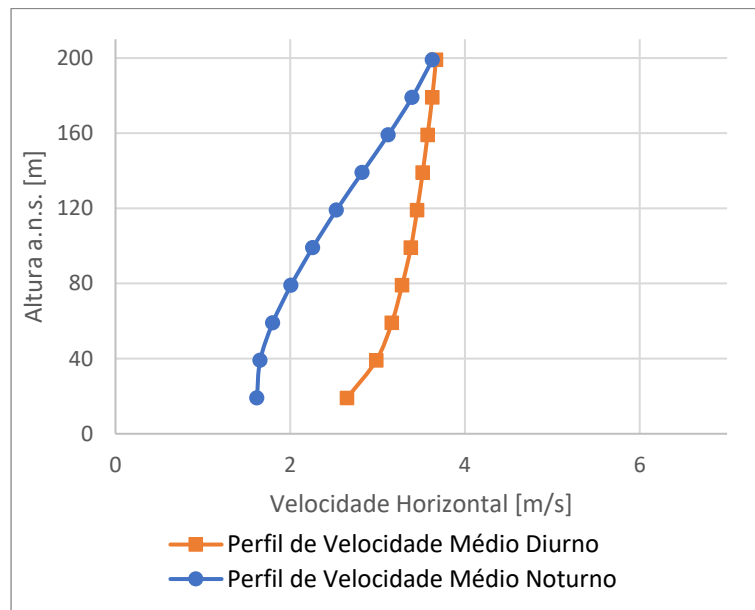


Figura 56 - Perfil de velocidades médio e independente da direção - Diurno vs Noturno (Zephir 111)

Também se calculou o *shear factor* entre as alturas de 20 e 100 metros *a.n.s.*, para que possa servir de comparação com outros dispositivos de medição. Assim, o *shear factor* entre os 20 e 100 metros *a.n.s* é de 0,15 para o período diurno e de 0,20 para o período noturno. Esta diferença menos drástica entre os dois valores de *shear factor* para estas alturas é consequência da estabilidade atmosférica que se faz sentir dentro da camada limite criada durante o período noturno.

Diferenciando a velocidade do escoamento quanto à sua direção, e comparando os diferentes perfis dos diferentes períodos aqui escolhidos, é possível perceber que a variação de velocidade horizontal média com a distância ao solo segue a forma exposta na Figura 56. Pode, também, perceber-se que ao período noturno estão associadas velocidades mais baixas do que as do período diurno para pequenas alturas, independentemente da direção. No entanto, para direções perpendiculares à cumeada, primeiro e terceiro quadrantes, a velocidade horizontal média aumenta bastante com a altura, chegando mesmo a ser maior que a velocidade horizontal média para essas direções. Isto deverá estar refletido num gráfico que confronte o *shear factor* com a direção do vento. Os gráficos que relacionam o perfil de velocidades com a direção foram remetidos para o Anexo D.

Assim, os valores de *shear factor* em função da direção do vento a 100 metros *a.n.s.*, originam o gráfico da Figura 57. Pode perceber-se que o *shear factor* diurno é sempre menor que o noturno,

independentemente da direção do escoamento. Pode também observar-se uma “rotação” do *shear factor*, ou seja, enquanto que durante o período diurno os rumos de máxima variação de velocidade com altura se dão para os rumos paralelos à cumeada, durante o período noturno esses rumos são os perpendiculares à cumeada. Isso corrobora o que foi visto nos perfis de velocidade, onde se verifica um grande aumento de velocidade em altura durante o período noturno, para ventos que, a 100 metros *a.n.s.*, sopram do primeiro e terceiro quadrantes.

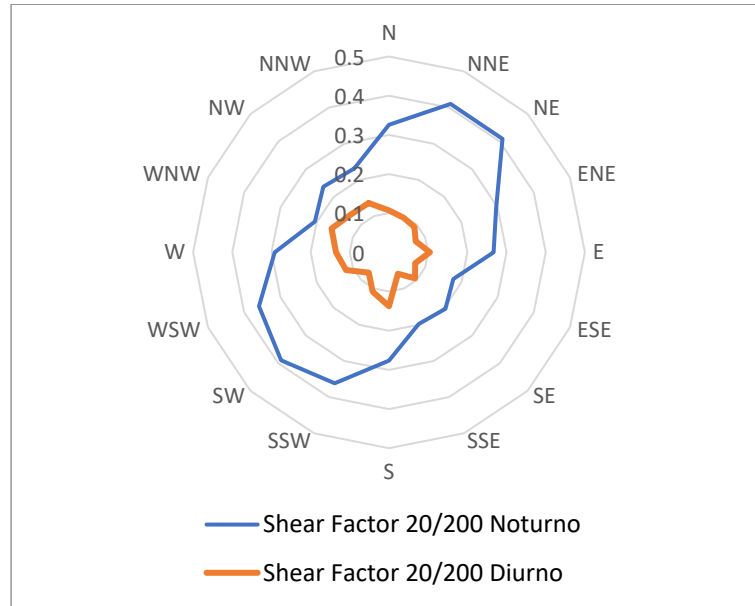


Figura 57 - Shear factor 20/200 em função da direção do escoamento @ 100 metros *a.n.s.* (diurno vs noturno)

Em termos de rotação em altura, a Figura 58 mostra a diferença entre a direção a 20 e a 100 metros *a.n.s.*. O que pode ser observado é que a rotação em altura é muito menor durante o período diurno, com um máximo de 13° de rotação. O período noturno apresenta não só uma maior rotação entre os 20 e os 100 metros, com um máximo de 32°, como também existe um pico de 71° de rotação do escoamento entre os 100 e os 200 metros, quando o vento sopra de Este a 100 metros *a.n.s.*. Como as ocorrências registadas de ventos que sopram de Este são bastante reduzidas (apenas 77), esta rotação acentuada pode ter sido causada por um fenómeno praticamente pontual e sem grande repetibilidade.

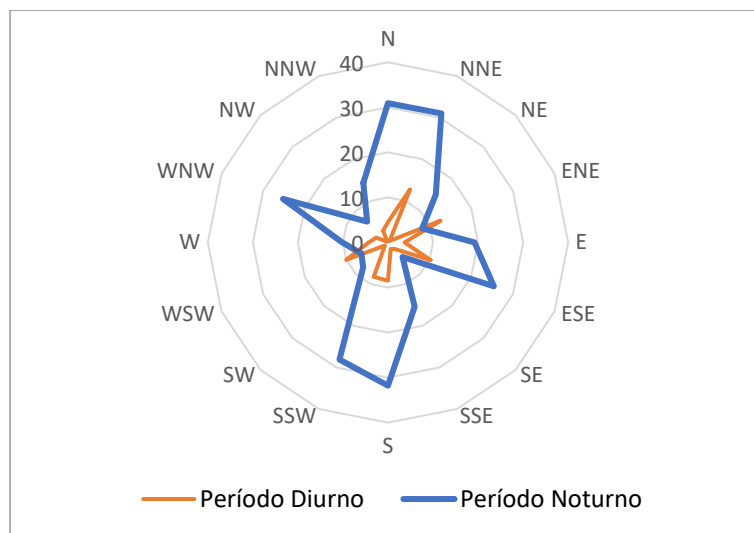


Figura 58 - Diferença entre a direção do escoamento a 10 e a 100 metros a.n.s. em função da direção @ 100 metros a.n.s. (Zephir 111)

Através da análise da intensidade de turbulência a diferentes alturas e para os diferentes períodos escolhidos, é possível concluir que, a tendência de aumento da intensidade de turbulência e diminuição da dispersão deste valor verifica-se à medida que se diminui a altura acima do nível do solo para o período diurno. Quanto ao período noturno, a ausência de velocidades de vento consideráveis, levou a que não fosse possível retirar quaisquer ilações dos gráficos de intensidade de turbulência em função da velocidade horizontal.

6.5 Estação de Medição 25

A Estação de Medição 25, ou Torre 25, foi também instalada no sopé interior ao vale da colina Este, a umas centenas de metros do LiDAR Zephir® 111. Tal como o Zephir®, também a torre se encontra montada num local rodeado de pequenas elevações. O relevo mais evidente é o da colina que perfaz praticamente todo o primeiro quadrante. Talvez menos evidente sejam as pequenas elevações a cobrirem praticamente todos os outros quadrantes, sendo a direção Noroeste a exceção à regra, sendo que o terreno nessa direção apresenta um declive praticamente constante e próximo de zero. A Figura 59 procura mostrar a forma do terreno envolvente, com um corte Norte-Sul. Cortes nas outras direções principais foram remetidos para o Anexo A.

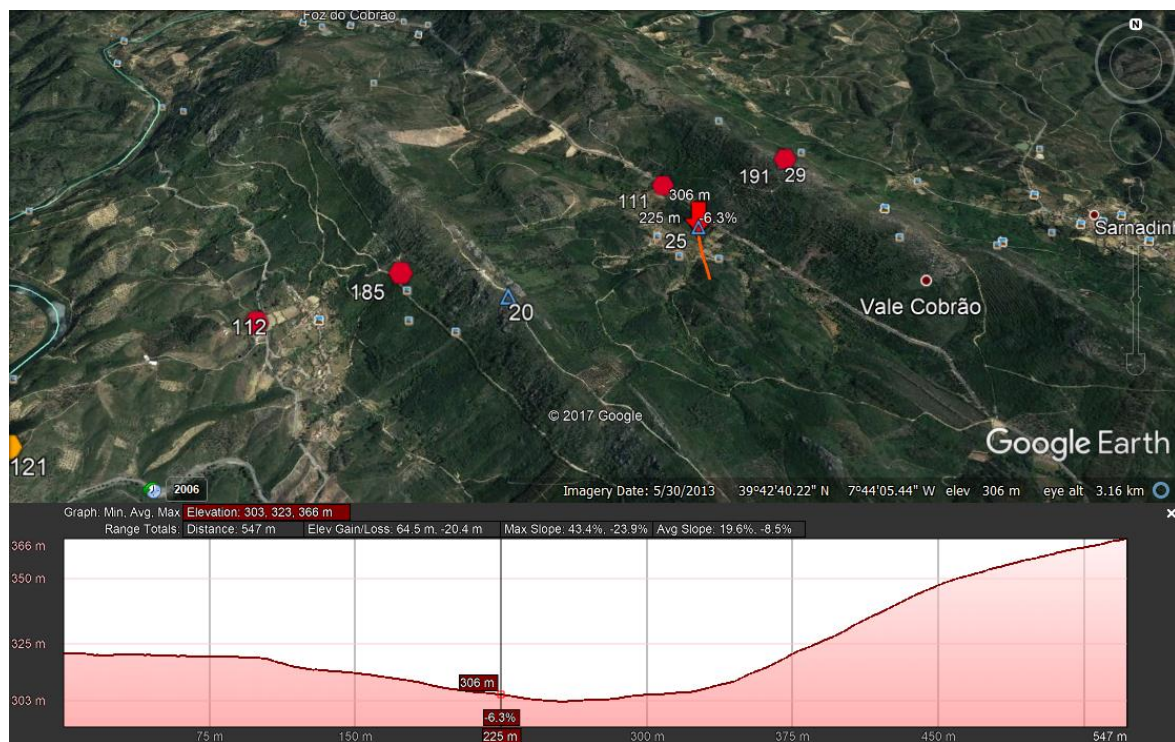


Figura 59 - Corte Norte-Sul (Torre 25)

Depois de aplicadas as filtragens referidas anteriormente, sobraram 17346 pontos, medidos desde dia 7 de abril de 2017, às 13h50, até dia 25 de setembro de 2017, às 11h00. Durante esse tempo de medição, o vento soprou maioritariamente paralelo à colina, para uma altura de 100 metros *a.n.s.*. Entre si, as direções Noroeste e Norte-Noroeste somaram 1880 e 1832 pontos, respetivamente, e as direções diametralmente opostas, Sudeste e Sul-Sudeste, somaram 826 e 1486 médias de 10 minutos. A distribuição dos pontos pelas diferentes direções à altura de 100 metros *a.n.s.* pode ser consultada no gráfico da Figura 60.

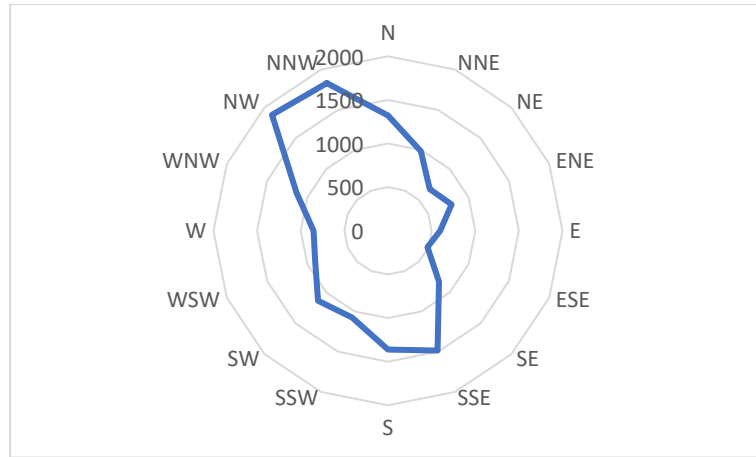


Figura 60 - Número de ocorrências para as diferentes direções @ 100 metros a.n.s. (Torre 25)

Esta predominância de ventos vindos do segundo quadrante já foi antes observada nas medições feitas pelo LiDAR 111. No caso do LiDAR, poucos foram os pontos relativos a ventos vindos de outros quadrantes que não o segundo, enquanto que no caso da torre 25 a distribuição de ventos dá-se maioritariamente para o segundo e quarto quadrantes. Isto indicia, no entanto, que existe também aqui uma tendência para o vento rodar em certas direções. Porém, uma comparação entre estes dois dispositivos só faria sentido caso existisse uma simultaneidade de medições que, nesta fase, ainda não foi garantida.

Uma análise ao perfil médio de vento, sem qualquer restrição à direção, mostra um perfil de velocidades baixas, cuja velocidade média máxima, que se dá para a altura de 100 metros, é de apenas 2,2 m/s. Como foi dito anteriormente, velocidades desta ordem de grandeza tornam o escoamento muito mais suscetível ao relevo da superfície e a fenómenos térmicos. Este perfil, exposto na Figura 61, tem-lhe associado um *shear factor* calculado pela Equação 5 de 0,42 entre 10 e 100 metros a.n.s.. Este é um valor bastante alto para este parâmetro e dificultaria a instalação de qualquer aerogerador numa zona com um vento com estas características. Um outro problema seria o facto de um aerogerador ser incapaz de extrair qualquer energia de um escoamento de tão baixa velocidade.

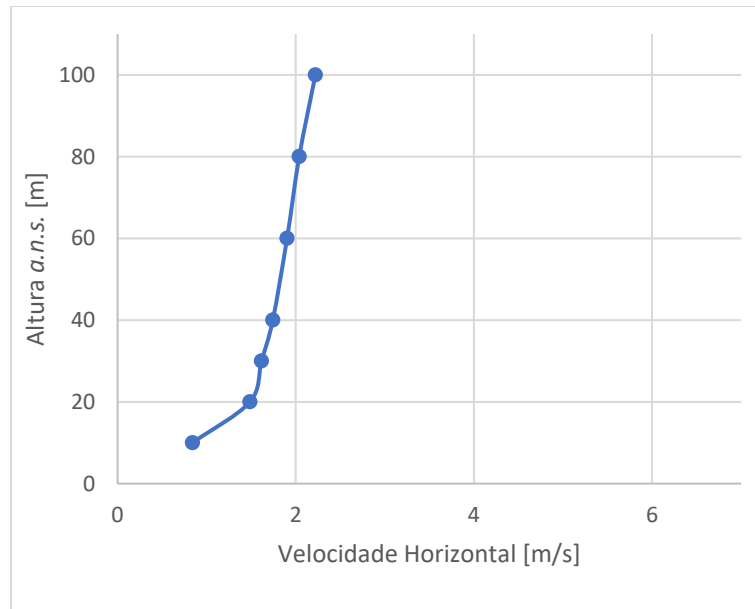


Figura 61 - Perfil de velocidades médio, medido pela Torre 25

Será interessante perceber como é que este perfil varia com a direção do vento e quais são os rumos críticos no que toca a parâmetros como o *shear factor*. Assim, dividiram-se os pontos nas 16 direções utilizadas anteriormente e traçaram-se os diferentes gráficos, que estão representados na Figura 62.

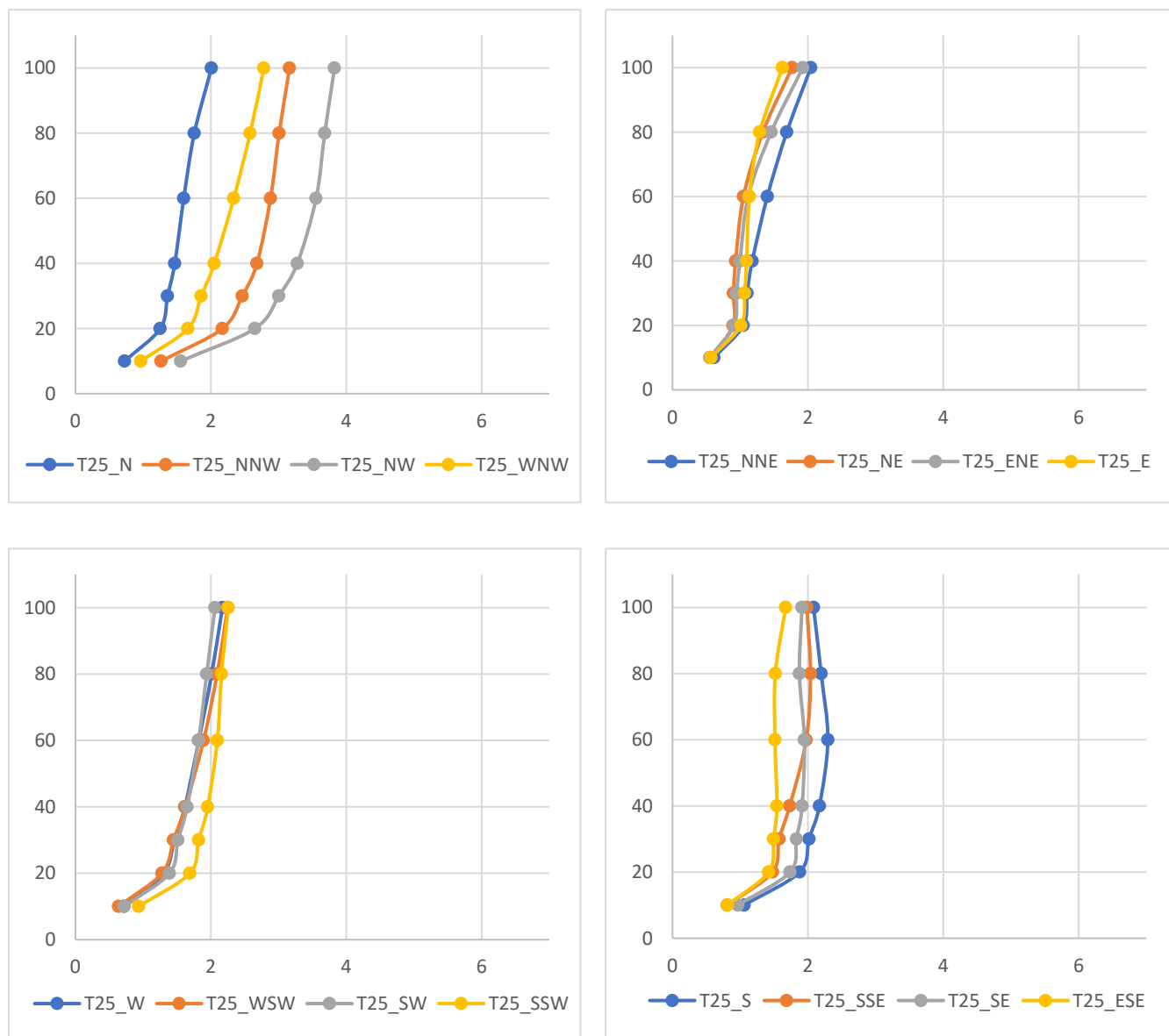


Figura 62 - Perfis de velocidade médios para as principais direções medidas @ 100 metros a.n.s. (Torre 25)

Observando os perfis de velocidade em função da direção do vento, consegue perceber-se que o perfil médio de velocidades da Figura 61 é quase que “replicado” em praticamente todos os quadrantes, com a exceção do segundo. Aliás, as únicas direções cujo vento é capaz de “quebrar a barreira” dos 3 m/s são as direções Norte paralelas à colina (Nor-Noroeste e Noroeste). Uma análise à topografia mostra que apenas nessas direções, como já foi dito anteriormente, o terreno apresenta um declive praticamente neutro, com um gradiente até ligeiramente positivo, que promove a aceleração do escoamento. Soprando de todas as outras, o vento passa pela torre ainda em “fase de recuperação”, após ter despendido energia na passagem por estas proeminências.

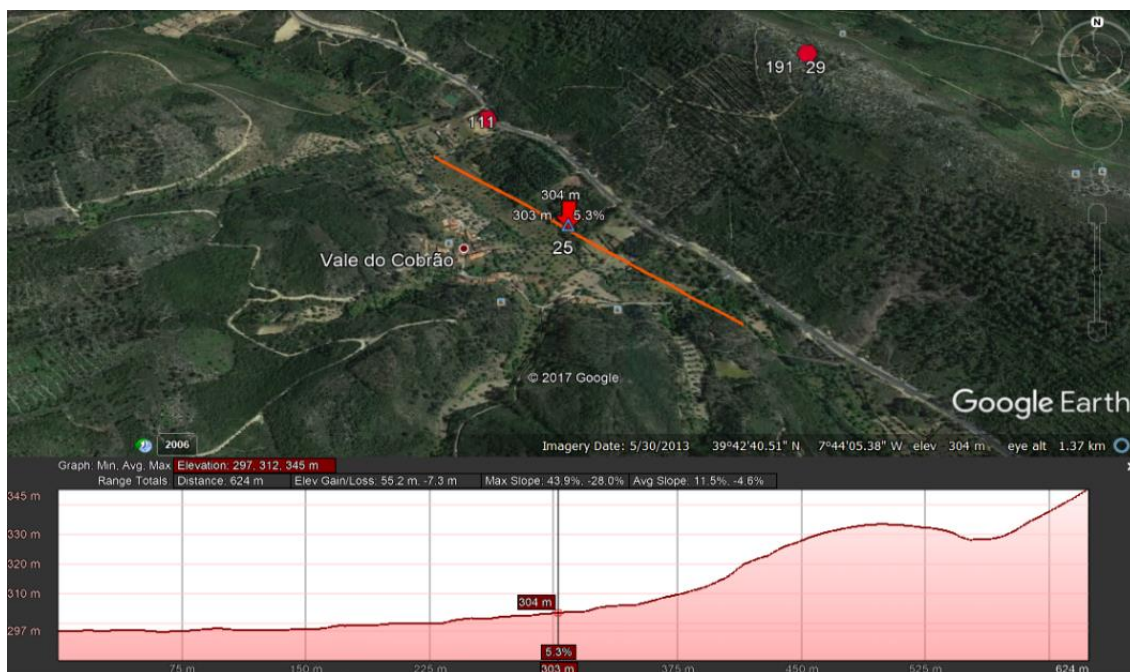


Figura 63 - Corte Noroeste-Sudeste (Torre 25)

Por consequência, também as direções do segundo quadrante deveriam ter-lhes associadas um *shear factor* mais elevado. No entanto, como as velocidades a 10 metros *a.n.s.* são tão baixas para as direções dos outros quadrantes, o cálculo do *shear factor* é majorado nestas direções. Apesar disso, como pode ser observado na Figura 64, o escoamento nesta zona pode ser caracterizado por grandes valores de *shear factor* em todas as direções, semelhante, mais uma vez, ao comportamento estudado no Zephir® 111.

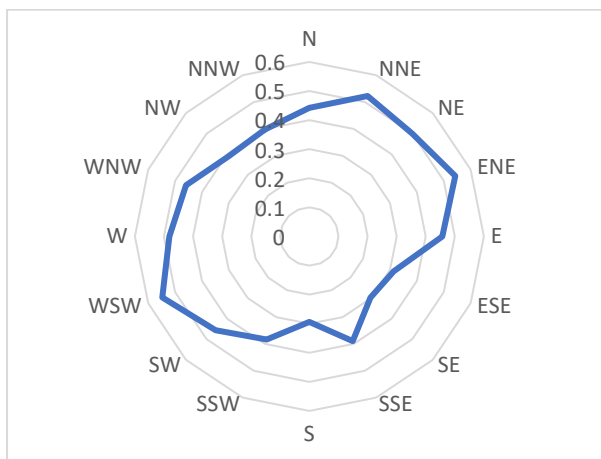


Figura 64 - Shear Factor 10/100 (Torre 25)

A complexidade do terreno que envolve a torre também será sentida na rotação do escoamento com a aproximação ao solo. Mais uma vez, as baixas velocidades que se fazem sentir, tornam as protuberâncias do terreno e a sua cobertura mais determinantes na definição da direção do escoamento. Como se pode

observar na Figura 65, existem grandes rotações do escoamento entre os 100 e os 10 metros *a.n.s.* para algumas direções específicas. Ventos que sopram entre NNW e E a 100 metros *a.n.s.* tendem a rodar e a “afunilar” para direções entre NNE e ENE a 10 metros acima do solo. Parece também existir uma mudança brusca de direção, comum a todas estas direções, a cerca de 30 metros de altura, com o escoamento a rodar acentuadamente entre os 40 e os 30 metros, e depois entre os 30 e os 10 metros. Já nos ventos dos terceiro e quarto quadrantes, a tendência registrada é a de haver uma rotação que leva o vento a soprar de Sul-Sudeste a 10 metros *a.n.s.*.

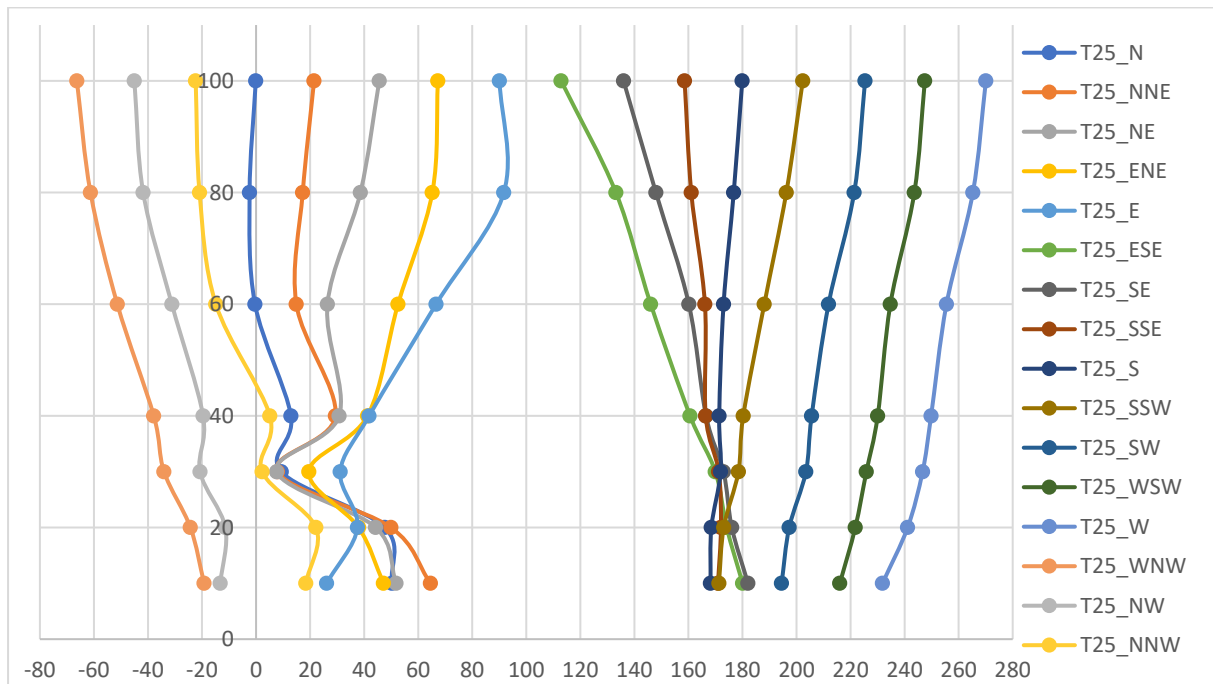


Figura 65 - Rotação do escoamento em altura (direção de referência medida à altura de 100 metros, Torre 25)

Isto pode ser observado num gráfico de ocorrências a 10 metros *a.n.s.*, Figura 66, onde se torna clara a predominância de ventos que sopram de SSE e NW. O grande número de ventos que sopram de SSE vem da rotação dos ventos que a 100 metros sopravam entre ESSE e SSW, enquanto que o aumento das ocorrências para NW vem da rotação do vento que a 100 metros soprava de WNW. Estas grandes rotações em altura mostrar-se-iam um grande desafio para a estrutura de um aerogerador e poria em causa o seu bom funcionamento. É uma das razões pelas quais é necessário um estudo das condições de vento até à altura máxima varrida pelas pás de uma turbina.

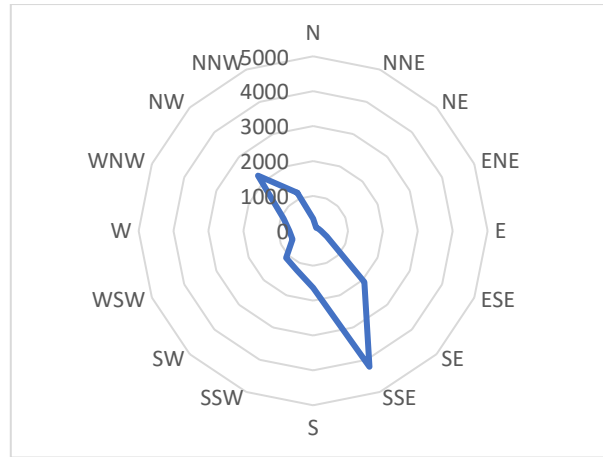


Figura 66 - Número de ocorrências para as diferentes direções @ 10 metros a.n.s (Torre 25)

Procurou-se, através de uma análise à inclinação do escoamento a 10 metros *a.n.s.*, perceber qual o efeito da topografia na inclinação do escoamento. No entanto, as grandes rotações observadas atrás, levam a que, como se pode ver na Figura 67, poucas sejam as ocorrências no primeiro quadrante, limitando as conclusões que se possam tirar. Consegue-se, ainda assim, perceber que o escoamento apresenta uma inclinação maioritariamente positiva quando se aproxima da torre vindo das direções compreendidas entre Sul e Nor-Noroeste. Os ventos destas direções preparam-se para subir a colina, pelo que adquirem, assim, o declive do solo.

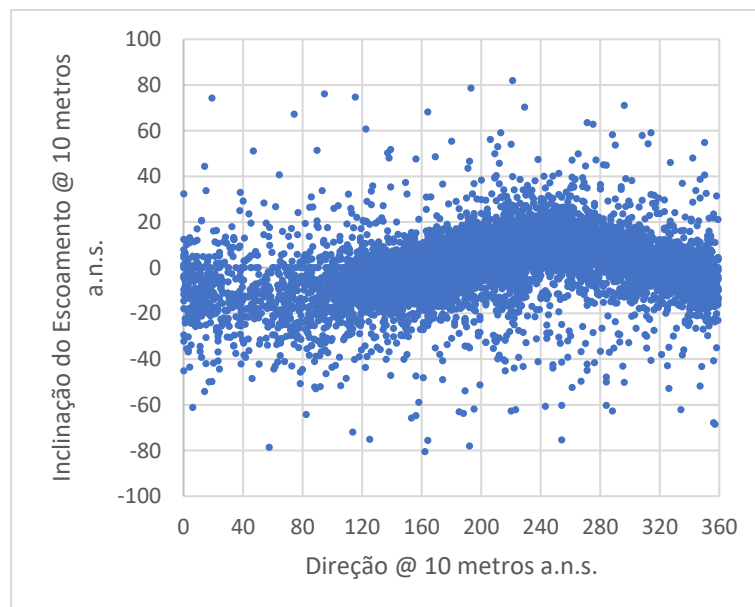


Figura 67 - Inclinação do escoamento em função da direção @ 10 metros a.n.s (Torre 25)

A análise à intensidade de turbulência é dificultada pela pequena quantidade de dados com velocidades superiores a 3 *m/s*. No entanto, uma análise aos gráficos que relacionam a intensidade de

turbulência com a velocidade horizontal permite observar uma aparente diminuição da dispersão dos valores de intensidade de turbulência com a aproximação ao solo. Também há uma diminuição deste parâmetro com o aumento da velocidade horizontal, para qualquer uma das alturas consideradas.

Para dividir as medições em diurnas e noturnas, utilizaram-se, como já foi feito anteriormente, as medições recolhidas entre as 9h00 e as 16h00 como horas diurnas, e as medições entre as 22h00 e as 05h00 como horas noturnas. Obtiveram-se 4966 e 4372 médias de 10 minutos para o período diurno e noturno, respetivamente. Estas medições dividem-se pelas 16 direções estudadas como mostra a Figura 68.

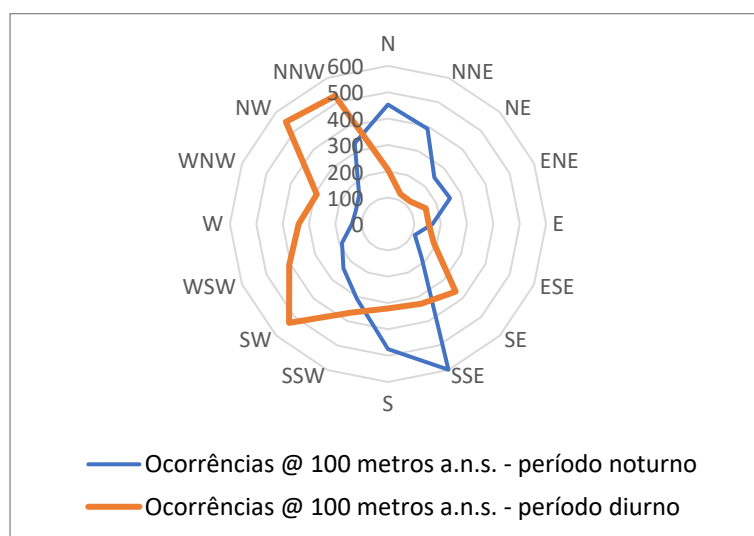


Figura 68 - Ocorrências em função da direção @ 100 metros a.n.s. – Diurno vs Noturno (Torre 25)

Uma análise aos perfis de velocidade média e independente da direção dos dois períodos permite perceber que o período noturno é caracterizado por ventos menos velozes. Contudo, a variação da velocidade do vento com a altura parece ser semelhante para ambos os períodos, algo que é visualmente aparente, e pode ser confirmado através do cálculo do *shear factor*. Através da utilização da Equação 5, calcularam-se os valores de 0,37 e 0,41 para os *shear factors* entre os 10 e os 100 metros a.n.s. diurno e noturno, respetivamente, uma diferença de cerca de 10%. Estes valores são elevados pelas baixas velocidades que estão associadas à altura de 10 metros. Se se aumentar a altura mínima e se se calcular o *shear factor* entre 20 e 100 metros a.n.s., obtêm-se os valores 0,20 e 0,31 para o período diurno e noturno, respetivamente.

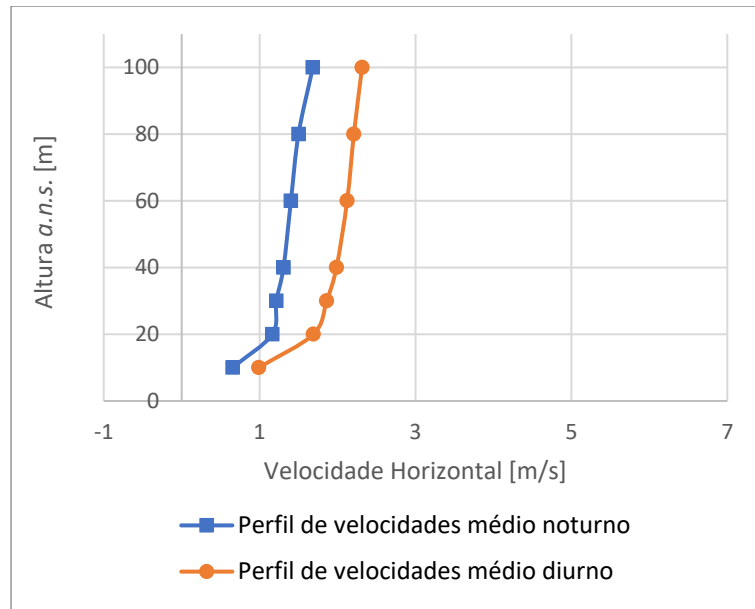


Figura 69 - Perfil de velocidades médio e independente da direção - Diurno vs Noturno (Torre 25)

Uma análise aos perfis verticais em função da direção a 100 metros *a.n.s.*, mostra que, durante as horas diurnas consideradas, a velocidade do escoamento nunca alcança os 4 *m/s* e só quando o vento sopra paralelo à cumeada, sentido Noroeste-Sudeste, a velocidade passa os 3 *m/s*. Consequentemente, é possível observar uma maior “abertura” do escoamento quando este sopra de quadrantes paralelos à cumeada, e perfis mais “fechados” quando o vento sopra perpendicular à cumeada. Apesar de se esperarem perfis mais verticais quando o escoamento tem de subir a colina, esta verticalidade deveria ser garantida por um aumento da velocidade do vento a baixas alturas, e não à diminuição da velocidade do vento longe do solo, como se verifica. Já durante a noite, verificam-se perfis de velocidade de forma mais complexa, que quase podem ser divididos em três secções: uma de grande variação de velocidade entre os 10 e os 20 metros, seguida de uma praticamente vertical até aos 40 metros e, por fim, uma terceira secção que tende a inverter quando o vento sopra entre Oeste, Norte e Este, sensivelmente, e a aumentar bastante a velocidade e a “abrir” mais quando o vento sopra entre Oeste, Sul e Este. Os gráficos dos perfis de velocidade média para cada um dos períodos foram remetidos para o Anexo D.

Uma outra perceção da forma do perfil vertical de velocidades em função da direção pode ser dada pela análise do gráfico da Figura 70.

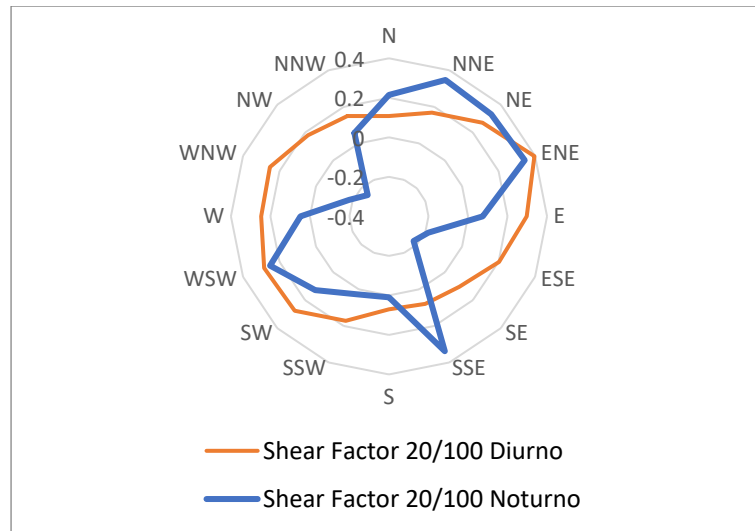


Figura 70 - Shear Factor em função da direção do vento @ 100 metros a.n.s. (Período Diurno vs Período Noturno)'

No caso do período diurno, pode observar-se que o *shear factor* máximo se dá para a direção Este-Nordeste e tem o valor de 0,4. No entanto, esta direção está associada a um baixo número de ocorrências, com apenas 155 médias de 10 minutos, pelo que este valor pode ser fruto de acontecimentos esporádicos e sem grande repetibilidade. Também é possível perceber que, durante o período noturno, as direções paralelas à cumeada apresentam perfis de velocidade invertidos, dado que o valor de *shear factor* para estas direções é menor que zero.

No que toca à rotação do escoamento com a variação da altura ao solo, pode notar-se, através da análise do gráfico da Figura 71, uma diferença nas direções de maior rotação para cada um dos períodos. O período diurno apresenta uma rotação geralmente menor que o período noturno, e atinge o seu valor máximo quando o vento sopra da direção Este. Esta é, no entanto, uma direção com um número reduzido de ocorrências, pelo que esta rotação pode ser fruto de acontecimentos esporádicos sem peso na caracterização do escoamento. Já no caso da rotação que se dá no período noturno, é de notar uma grande rotação para as direções paralelas à cumeada. Estas rotações ocorrem pelo arrefecimento da encosta da colina durante a noite. Este arrefecimento promove um escoamento que desce a colina e acompanha o relevo. Estas grandes rotações estão, assim, associadas a fenómenos térmicos e são originadas pela interação entre ventos de baixa velocidade e a topografia do local.

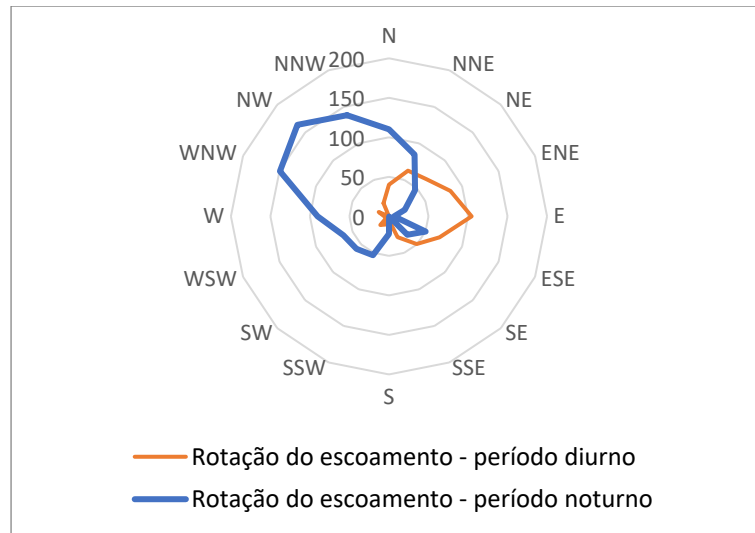


Figura 71 - Rotação do escoamento entre os 10 e os 100 metros a.n.s. (direção de referência @ 100 metros a.n.s.). - período Diurno vs Noturno (Torre 25)

Como foi dito anteriormente, o baixo número de ocorrências a velocidades interessantes para o estudo da intensidade de turbulência torna difícil uma comparação entre as intensidades de turbulência a pequenas e a grandes alturas. Por isso, apenas se analisou a diferença entre os valores deste parâmetro durante o dia e a noite a alturas superiores a 60 metros *a.n.s.*. Conclui-se que, durante o período noturno, a intensidade de turbulência aparenta ser menor do que durante o período diurno, mas mais dispersa. No entanto, seria interessante comparar o valor deste parâmetro para mais alturas, em períodos com ventos mais velozes.

6.6 Estação de Medição 29 e Windcube®

Foi feita, num capítulo anterior, uma comparação entre os dados da Torre 29 e os dados do LiDAR Windcube®. Pôde concluir-se que os dados de velocidade medidos pelo LiDAR se apresentam, em média, superiores aos lidos na Torre 29. Esta diferença é de cerca de 8%, com um coeficiente de correlação de 0,92.

Na análise do escoamento quando este passa pelo cume da colina Este, decidiu-se utilizar os dados de ambos os dispositivos de medição utilizados. Os dados dos anemómetros sónicos instalados na torre de medição, aqui tidos como medidores *standard*, foram utilizados como dados de referência e, por isso, foram usadas as medições na torre até os 100 metros *a.n.s.*. Dada a incapacidade da torre de medir a partir dessa altura, utilizaram-se os dados do LiDAR recolhidos para as alturas entre 100 e 200 metros *a.n.s.*, tendo em conta uma possível majoração de cerca de 8%.

Ambos os aparelhos de medição estão montados no cume da colina Este, como dito anteriormente. Espera-se que esta posição tenha uma grande influência no que toca à inclinação e velocidade do escoamento quando o vento sopra de setores perpendiculares à cumeada. Isto porque, como foi já relatado para algumas situações anteriores, o escoamento mais afastado do solo praticamente não é afetado pela topografia, mas, no entanto, o mesmo não acontece para as camadas mais baixas do escoamento. Nestas camadas, o escoamento procura adquirir a inclinação do solo e seguir o caminho de “menor resistência”. No entanto, quanto maior for a velocidade do escoamento, maior será a inércia que está associada ao seu movimento e menor será a capacidade de o escoamento rapidamente mudar a sua direção e/ou sentido. Isto pode levar a zonas de recirculação, quando o escoamento não consegue acompanhar uma rápida mudança de declive do solo, e a uma relativamente acentuada inclinação do escoamento mesmo em terreno praticamente plano, como no topo da cumeada.

Começou-se, por analisar o terreno que envolve estes dispositivos. A topografia deste local nas direções perpendiculares ou oblíquas à colina apresenta um declive praticamente constante para cada um dos lados da colina. Já na direção paralela à cumeada, no cume, são mais aparentes protuberâncias que complexificam o terreno. Um corte paralelo à cumeada pode ser analisado na Figura 72.

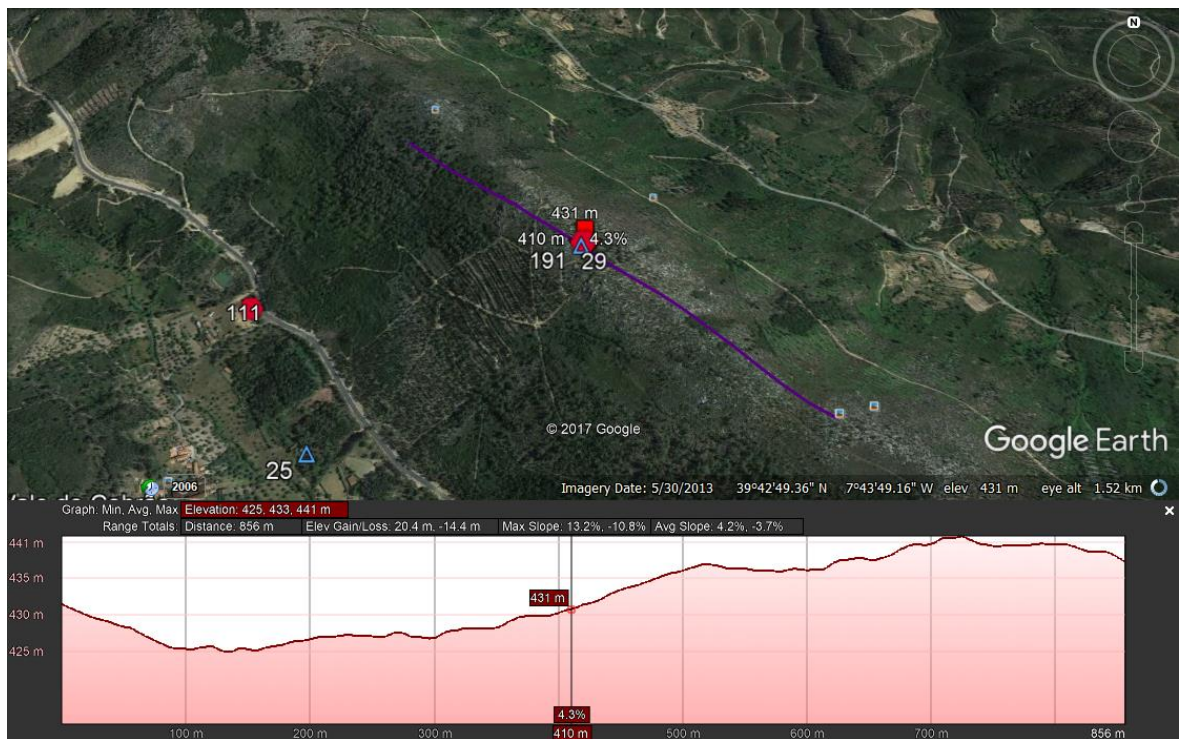


Figura 72 - Corte paralelo à cumeada (NW - SE) - Torre 29 e Windcube®

Como se procura utilizar os dados do Windcube® e da Torre 29 nesta análise, teve de se garantir a utilização de registos concorrentes. O resultado foi igual ao utilizado na comparação entre as medições destes dois dispositivos, um conjunto de 9291 registos, já após a filtragem mas sem restrições de direção, que começam a 07 de Abril de 2017, às 13h50, e terminam a 31 de Julho de 2017, às 19h20.

Para perceber de que forma se distribuem estes dados pelas diferentes direções, traçou-se um gráfico de ocorrências a 100 metros *a.n.s.*, apresentado na Figura 73. É possível perceber que existe uma predominância de ocorrências de ventos de sopram dos primeiro e segundo quadrantes, com 27 e 34% das ocorrências, respetivamente. Predominantemente, o vento sopra de Este, com 12% das ocorrências, e de Noroeste, que conta com 11%. Poucas são as vezes que o vento sopra de Sul, com esta direção a somar apenas 161 ocorrências, ou seja, 2% do total.

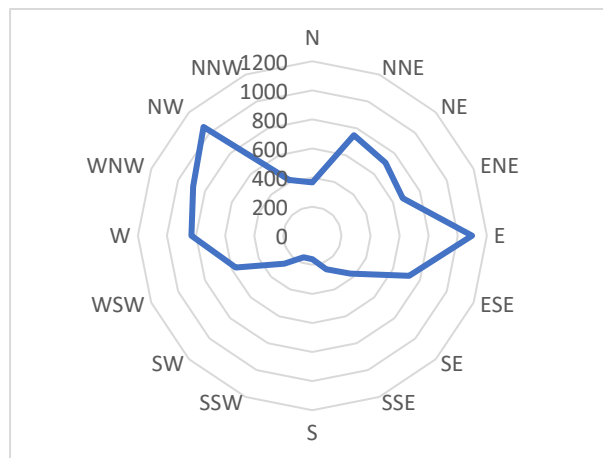


Figura 73 - Ocorrências a 100 metros *a.n.s.* (Torre 29)

Uma outra forma de melhor perceber como é a topografia do local em torno destes dispositivos e a forma como o relevo afeta o escoamento, traçou-se um gráfico que relaciona a inclinação com a direção do escoamento, ambos medidos a 10 metros *a.n.s.*. Esse gráfico está representado na Figura 74.

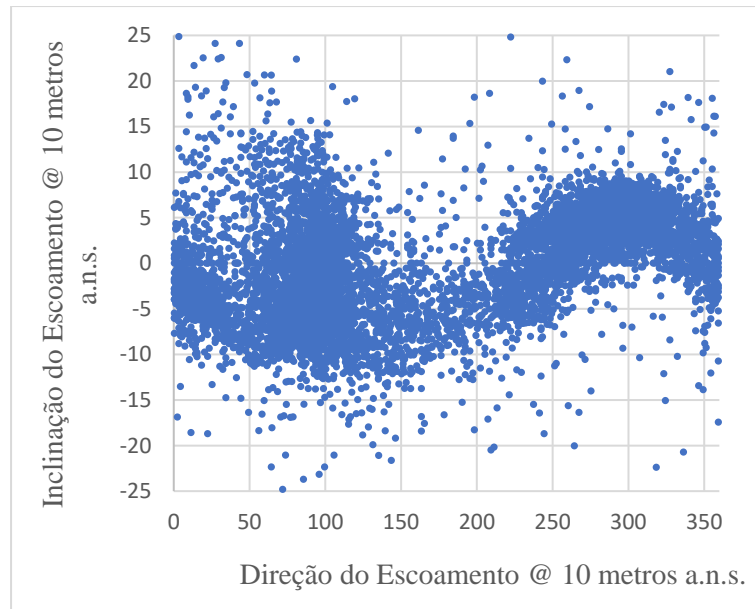


Figura 74 - Inclinação do escoamento em função da direção @ 10 metros a.n.s. (Torre 29)

O que se torna imediatamente aparente são as grandes inclinações associadas a este escoamento para algumas direções, com valores de inclinação a chegarem a mais de 20°. Isto seria espectável tendo em conta o posicionamento da torre de medição. É de notar, também, que existe alguma “indefinição” na inclinação do escoamento entre Este-Nordeste e Este-Sudeste, sensivelmente, que apresenta praticamente tantas leituras de inclinações positivas como negativas, na mesma ordem de grandeza. A partir desse ponto e até Su-Sudoeste a inclinação aparenta ser maioritariamente negativa, mas o baixo número de pontos reduz a confiança em quaisquer conclusões tiradas. Entre Su-Sudeste e Nor-Noroeste, o escoamento adquire uma inclinação maioritariamente positiva.

Se se analisar o corte do terreno entre Este-Nordeste e Oeste-Sudoeste, representado na Figura 75 com a posição da torre assinalada, pode perceber-se que a posição da torre não é mais próxima da colina Este. O mesmo pode ser observado no corte Este-Oeste e no corte Este-Sudeste e Oeste-Noroeste, remetidos para o Anexo A. Esta posição poderá explicar a diferença na inclinação entre os ventos que sopram do primeiro quadrante e os ventos que sopram do terceiro quadrante. Quando o escoamento tem como rumo Este-Nordeste para Oeste-Sudoeste, ou Este para Oeste, passa pela torre quando o terreno já tem um pequeno declive negativo.

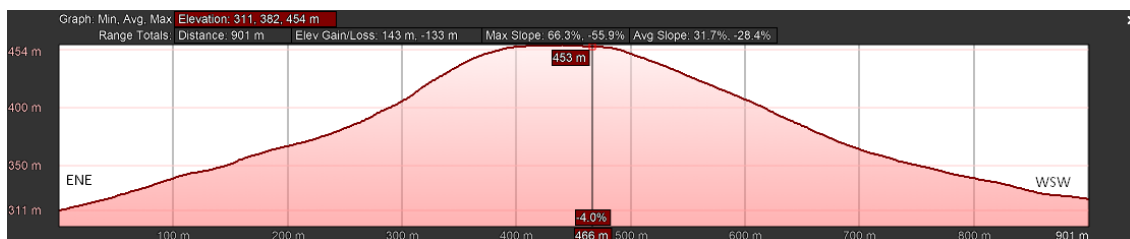


Figura 75 - Corte ENE - WSW da colina Este

Já na direção diametralmente oposta, o declive do terreno ainda é positivo quando o escoamento passa pela torre, o que leva a uma melhor definição da inclinação do escoamento para o segundo quadrante. O primeiro quadrante está, também, associado a ventos de menores velocidades, o que ajuda à “indefinição” da inclinação do escoamento para estas direções. Se se retirarem todos os pontos associados a velocidades menores que 2 m/s, apesar de se eliminarem bastantes pontos, é mais aparente o efeito do declive, com uma clara distinção entre inclinação negativa até Sudoeste, sensivelmente, e positiva entre Sudoeste e Nor-Noroeste. A velocidade de 2 m/s foi utilizada por ser uma velocidade relativamente baixa e permitir manter um número de registos ainda substancial. Este novo gráfico, que agora conta com 3589 pontos, está representado na Figura 76.

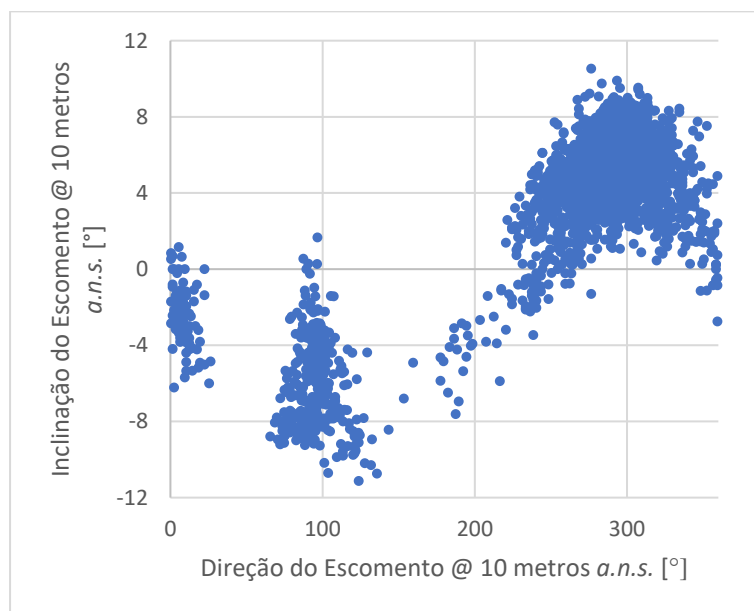


Figura 76 - Inclinação do escoamento em função da direção @ 10 metros a.n.s., para velocidades superiores a 2 m/s (Torre 29)

A inclinação do escoamento não será o único parâmetro a ser influenciado pela topografia. Aliás, a variação da velocidade vertical levará a uma variação da velocidade horizontal do escoamento, sendo esta última a principal responsável pelo movimento das pás de um aerogerador. Para perceber como varia esta velocidade com o afastamento do solo, traçou-se o perfil de velocidades médio e independente da

direção. A Figura 77 mostra esse perfil. Através da Equação 5 calculou-se o *shear factor* deste perfil e chegou-se ao valor de 0,36, valor elevado mas espectável tendo em conta a “abertura” do perfil médio.

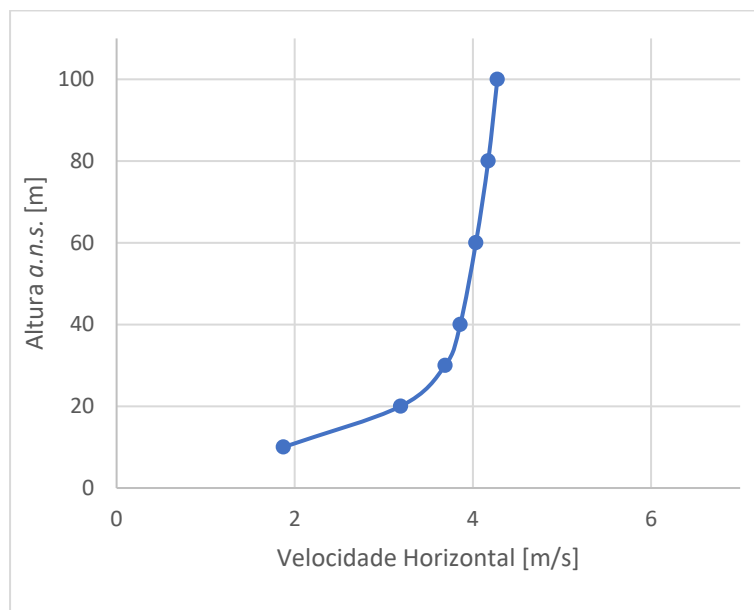


Figura 77 - Perfil de velocidades médio e independente da direção (Torre 29)

Também é possível observar que aqui o vento sopra com mais intensidade, sendo em média superior a 4 m/s já a partir dos 60 metros *a.n.s.*. Podem agora utilizar-se os dados medidos pelo Windcube® para perceber como varia a velocidade do escoamento com o aumento da altura após os 100 metros *a.n.s.*. O perfil médio e independente de direção está representado na Figura 78. Deve ser tida em atenção um possível erro de medição por parte do LiDAR que deverá majorar as velocidades medidas.

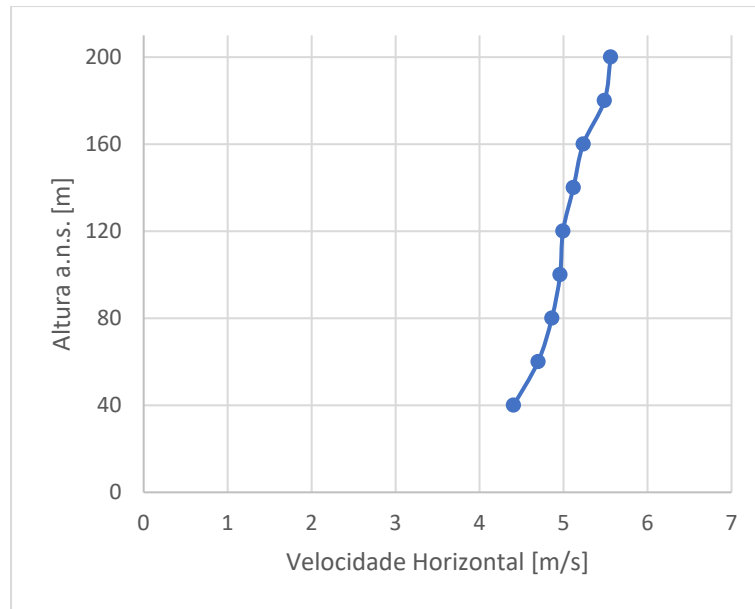


Figura 78 - Perfil de velocidades médio e independente da direção (Windcube®)

Por comparação com os dados da torre de medição existe uma sobrevalorização da velocidade horizontal por parte do LiDAR. Apesar disso, é possível perceber que existe um aumento gradual da velocidade em altura, com velocidades entre os 5 e os 6 m/s a 200 metros *a.n.s.*. O *shear factor* associado a este perfil, segundo a Equação 5, entre os 40 e os 200 metros *a.n.s.*, é de 0,14. Este valor é muito mais baixo do que o da torre por não medir as velocidades baixas associadas a alturas mais perto do solo. Para que se possam comparar os valores medidos pelos dois dispositivos, deve ser calculado o *shear factor* entre as alturas de 40 e 100 metros. Os valores calculados são de 0,11 para a torre e 0,13 para o LiDAR.

Confrontando a velocidade com a direção do escoamento, é possível traçar os perfis de velocidade para os diferentes rumos. Numa primeira análise utilizando os valores lidos na torre, Figura 79, é possível observar que os perfis são muito “abertos” quando o vento sopra dos primeiro e quarto quadrantes, com velocidades médias na casa dos 1 m/s a 10 metros e, para algumas direções, a superar os 5 m/s na altura máxima.

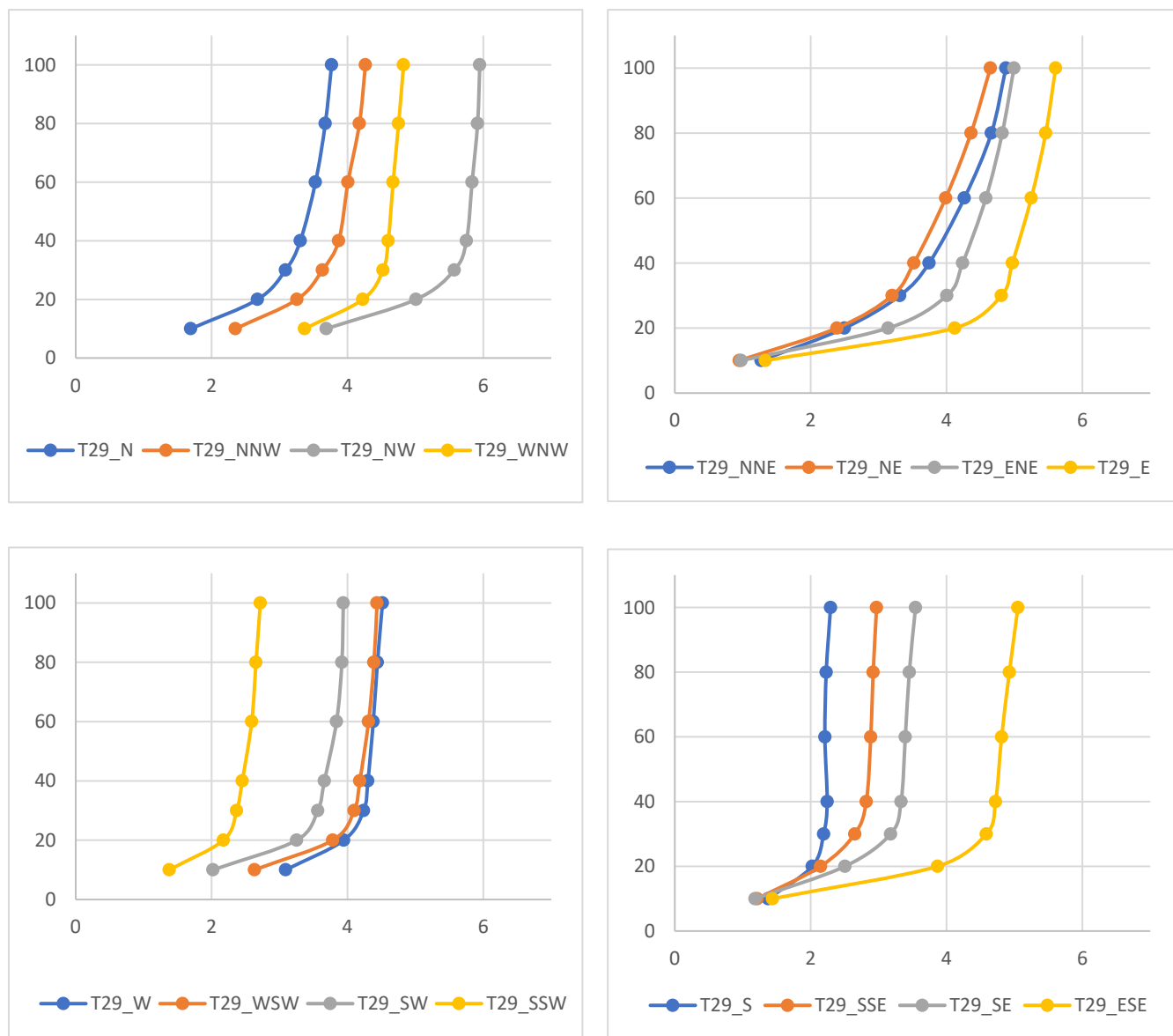


Figura 79 - Perfis de velocidade médios para as principais direções medidas @ 100 metros a.n.s. (Torre 29)

Os ventos mais velozes sopram de Este, Este-Sudeste e Noroeste, todos eles a passarem a marca dos 5 *m/s*. Quanto à variação da velocidade em altura, seria de esperar que o perfil de velocidades fosse mais vertical para as direções perpendiculares à cumeeada, seguidas das direções obliquas e, por fim, das direções paralelas. No entanto, como se pode verificar no gráfico que relaciona o *shear factor* com a direção na Figura 80, os valores de *shear factor* são maximizados para as direções perpendiculares à cumeeada, mais especificamente quando o vento sopra da colina Este. Atribui-se este efeito à localização da torre, um pouco mais próxima da colina Oeste. Como o escoamento já chega aos anemómetros depois

de percorrer o cume e no início da descida, cria-se ali uma zona de baixas velocidades perto do solo que, por sua vez, leva a um *shear factor* mais elevado.

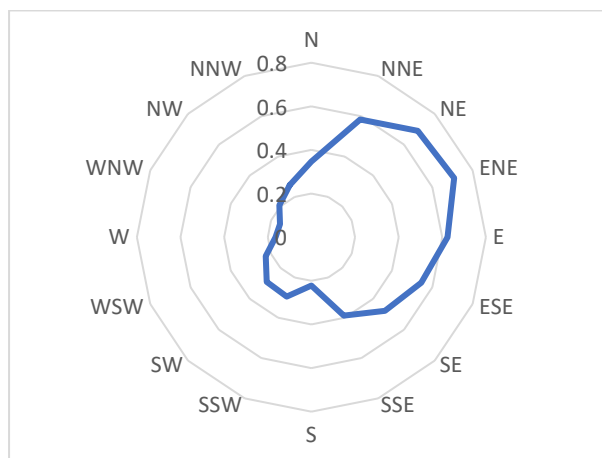


Figura 80 - Shear factor em função da direção @ 100 metros a.n.s. (Torre 29)

Verifica-se alguma rotação em altura, maioritariamente para ventos do primeiro e segundo quadrantes, onde ventos que sopram destas direções tendem a rodar no sentido retrógrado.

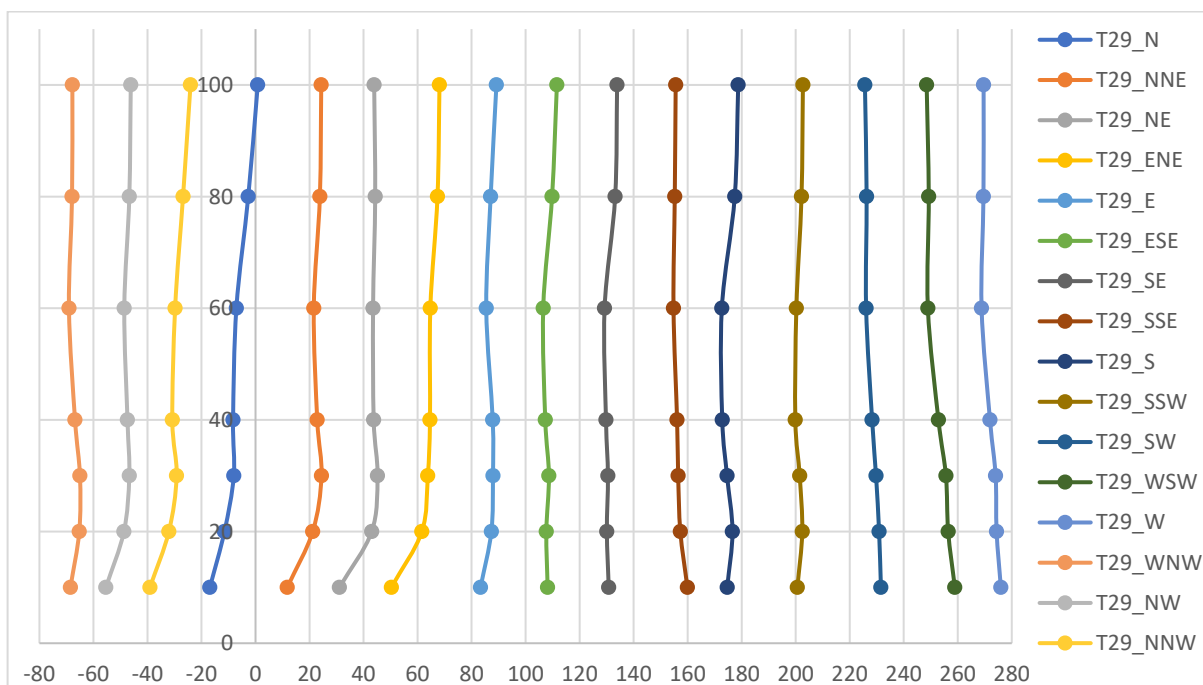


Figura 81 - Rotação em altura em função da direção a 100 metros a.n.s. (Torre 29)

Para o resto das direções existe sempre alguma rotação do escoamento com a variação da altura ao solo, mas não é uma variação de direção tão dramática como a verificada para no primeiro e segundo quadrantes. A análise dos dados do Windcube® e traçando o mesmo gráfico da Figura 81, corrobora esta

constatação e mostra que não existe uma rotação acentuada, em média, do escoamento entre os 200 e os 100 metros *a.n.s.*.

Para que se possa visualizar melhor quais os setores afetados por uma maior rotação do escoamento, traçou-se um gráfico do tipo radar, que relaciona a diferença entre as direções a 100 e a 10 metros, com a direção do escoamento a 100 metros. Esse gráfico está representado na Figura 82.

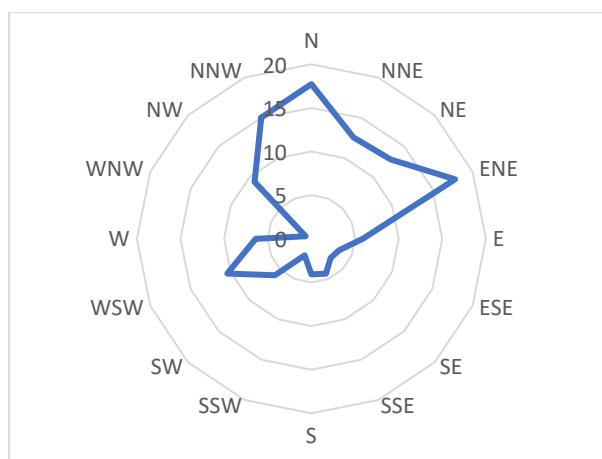


Figura 82 - Rotação entre os 10 e os 100 metros *a.n.s.* em função da direção a 100 metros *a.n.s.*

Apesar de não mostrar o sentido da rotação, o gráfico da Figura 82 confirma o que foi dito anteriormente: as maiores rotações do escoamento dão-se para as direções do primeiro e segundo quadrantes. Também se verifica alguma rotação para escoamentos de Oeste-Sudoeste, mais de 10°. Esta rotação também se dá no sentido retrógrado.

Uma análise à intensidade de turbulência mostra valores bastante elevados para toda a gama de velocidades. Mesmo contabilizando apenas os valores de velocidade iguais ou superiores a 3 m/s, registam-se muitos pontos com a intensidade de turbulência acima dos 40%.

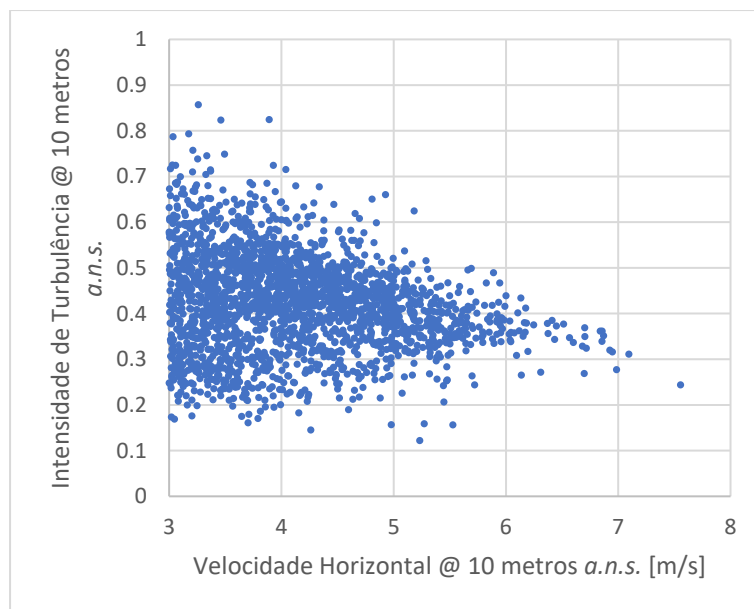


Figura 83 - Intensidade de Turbulência em função da velocidade horizontal (@ 10 metros a.n.s.) - Torre 29

Dividiram-se as medições em diurnas e noturnas, como já foi feito anteriormente, e para isso dividiram-se medições recolhidas entre as 9h00 e as 16h00 como horas diurnas, e as medições entre as 22h00 e as 05h00 como horas noturnas. Obtiveram-se 2471 e 2719 médias de 10 minutos para o período diurno e noturno, respetivamente. Estas medições dividem-se pelas 16 direções estudadas como mostra a Figura 84.

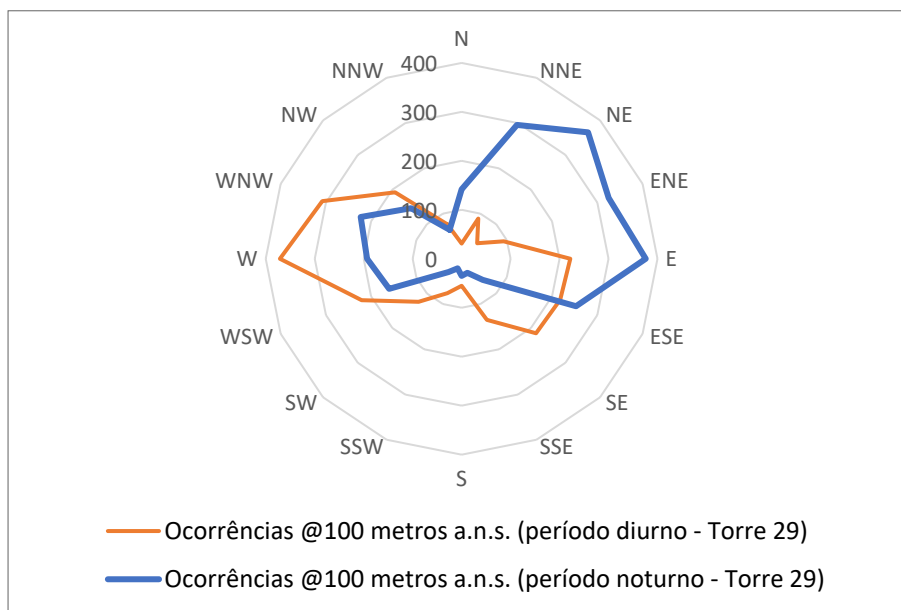


Figura 84 - Ocorrências em função da direção (@ 100 metros a.n.s.) - período diurno e noturno

Pode observar-se uma predominância das direções oblíquas e paralelas à cumeadra durante o dia e, durante a noite, apesar de haver algumas ocorrências nas direções paralelas à cumeadra, o maior número de registos é relativo a ventos que sopram perpendicularmente à colina. Em ambos os casos, são residuais as ocorrências de ventos vindos de Norte ou de Sul.

Analisando agora os perfis de velocidade médio e independentes da direção, Figura 85, pode concluir-se que não existem grandes diferenças entre o perfil diurno e o noturno, com o maior afastamento entre os dois a dar-se para alturas de 100 metros *a.n.s.*. Apesar de as diferenças não serem grandes, pode observar-se que a velocidade média do escoamento à noite é superior à velocidade média do escoamento durante o dia, independentemente da altura.

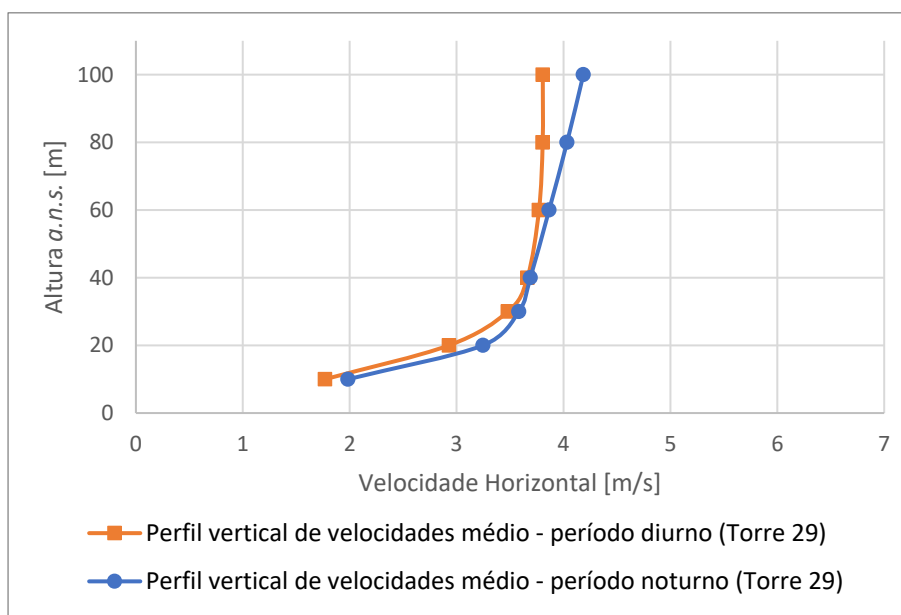


Figura 85 - Perfil de velocidades médio e independente da direção - Diurno vs Noturno (Torre 29)

Se se traçarem os perfis de velocidade em função da direção, para as 16 direções diferentes anteriormente utilizadas, podem observar-se mais algumas diferenças entre os perfis diurnos e noturnos, que estão mascarados no perfil médio da Figura 85. Os perfis de velocidades médio para cada uma das direções estudadas foram remetidos para o Anexo D. Os casos mais relevantes e que mostram diferenças mais claras entre os perfis diurnos e noturnos estão representados na Figura 86.

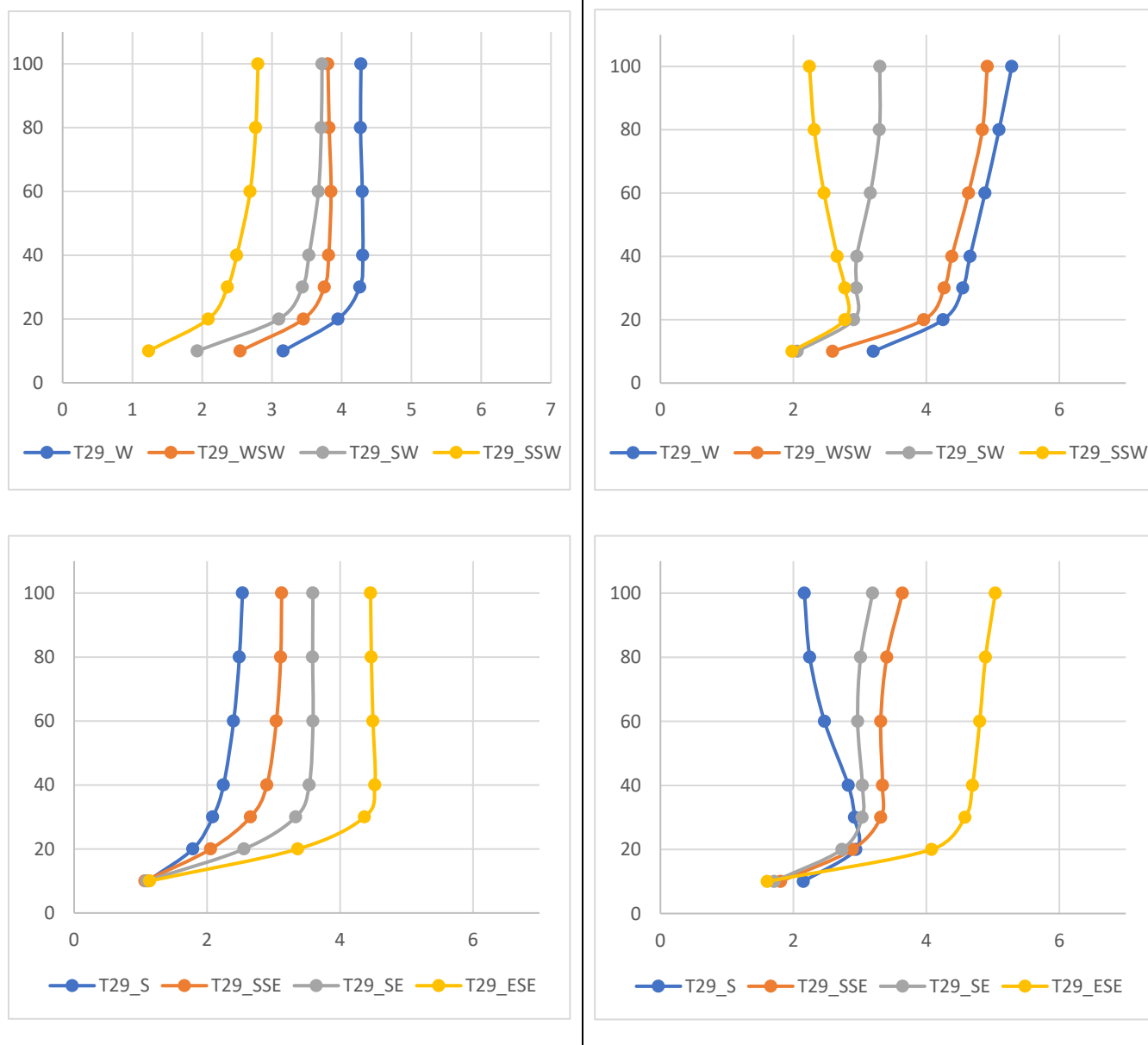


Figura 86 - Perfis de velocidade média em função da direção @ 100 metros a.n.s. (à esquerda: Período diurno; à direita: Período noturno) - Torre 29

Através da análise dos gráficos da Figura 86, é possível observar uma inversão do perfil de velocidades para as direções Sul e Su-Sudoeste durante o período noturno. O mesmo não acontece para o período diurno. Assim, por serem direções que lhes têm associadas velocidades baixas, e por sofrerem uma inversão do perfil apenas no período noturno, é possível concluir que este fenómeno é fruto de mecanismos térmicos que atuam sobre o escoamento. Também, olhando para o número de ocorrências nestas direções, se pode perceber que raros são os registos de vento que sopra de Sul ou Su-Sudeste, pelo que este fenómeno pode não ter uma repetibilidade associada, limitando assim as ilações que podem ser tiradas.

A variação dos perfis com a direção também pode ser estudada através de um gráfico que relaciona o *shear factor* com a direção do vento a 100 metros *a.n.s.*. Esse gráfico está representado na Figura 87, onde estão traçados os *shear factor* diurnos e noturnos.

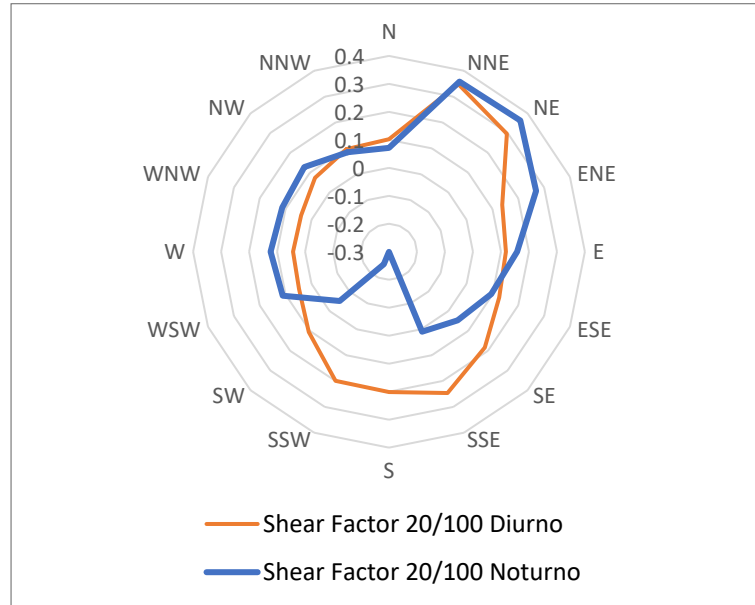


Figura 87 - Shear factor diurno e noturno em função da direção @ 100 metros *a.n.s.* - Torre 29

É possível notar um *shear factor* ligeiramente maior durante o período noturno, quando comparado com o diurno, mas de forma geral os valores entre os dois períodos são semelhantes, como seria de esperar através da observação dos perfis médios de velocidade da Figura 85. No entanto, é aparente a inversão dos perfis observada nas direções a Sul, com o valor do *shear factor* noturno a ser negativo mas, em módulo, a ter um valor próximo do valor do período diurno.

A Figura 88 mostra o módulo da diferença entre a direção a 10 e a 100 metros *a.n.s.*, em função da direção do escoamento a 100 metros *a.n.s.*, para ambos os períodos. Pode-se concluir, através da análise desse gráfico, que estão associadas a rotações maiores durante a noite, com as direções de velocidades mais baixas associadas a maiores rotações do escoamento. Por sua vez, as direções com velocidades maiores associadas apresentam uma rotação menor. O mesmo é verdade para o período diurno.

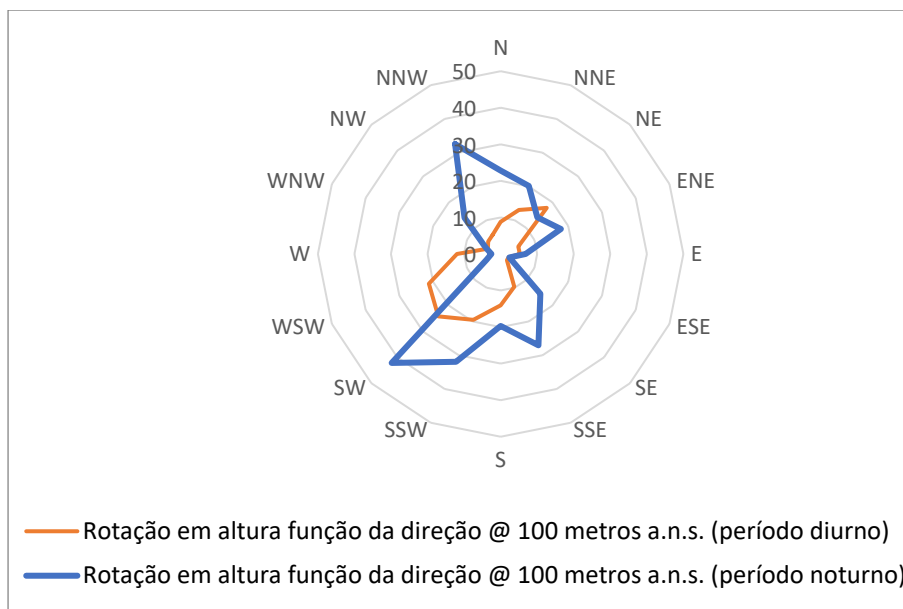


Figura 88 - Diferença entre a altura a 100 e a 10 metros a.n.s. em função da direção a 100 metros a.n.s.

A intensidade de turbulência difere, entre o dia e a noite, da mesma forma que tinha sido observado na análise dos dados de outros dispositivos. Existe um aumento da intensidade de turbulência e uma diminuição da dispersão dos pontos com a aproximação ao solo, algo que é comum aos dois períodos selecionados. É de notar, no entanto, como se pode observar na Figura 89, uma maior intensidade de turbulência registada durante o período diurno. Isto deverá estar relacionado com a maior estabilidade atmosférica do escoamento durante o período noturno.

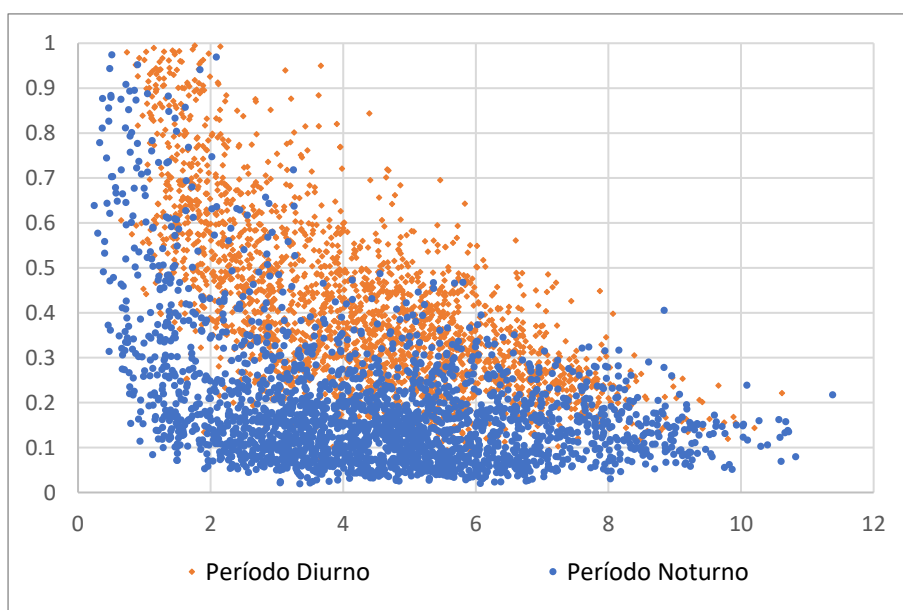


Figura 89 - Intensidade de turbulência função da direção @ 60 metros a.n.s. (Torre 29)

7. Análise simultânea - noção de campo

Nesta análise, procura-se perceber de que forma o escoamento evoluiu ao longo do terreno. Assim, procura-se perceber não só o que se passa pontualmente, mas também que tipo de diferenças existem nas propriedades do escoamento como a velocidade e direção, para medições simultâneas em diversos pontos do terreno.

Para realizar esta análise de campo é necessária a comparação entre as medições dos diferentes dispositivos utilizados. Assim, começou-se por filtrar os dados, de forma a que apenas se contabilizassem as medições efetuadas em tempos concorrentes para todos os medidores. O resultado desta filtragem foi um conjunto de 3198 médias de 10 minutos, desde o dia 7 de abril de 2017, às 15h00, até dia 16 de junho de 2017, às 13h40. As filtrações aplicadas aos dados foram as mesmas que foram descritas num capítulo anterior. É um conjunto de pontos pequeno relativamente aos utilizados na análise individual dos dispositivos, mas deverá ser suficiente para que sejam tiradas ilações válidas desta análise.

Numa análise deste tipo, focaram-se variáveis como a velocidade horizontal e a direção do escoamento, na tentativa de perceber qual o percurso do vento ao longo das colinas e do vale.

Para que possam ser comparados os dados de vento ao longo de todo o terreno é necessário algum tipo de medidor e/ou parâmetro de referência. O facto de existirem inúmeros pontos recolhidos e de todos os valores recolhidos serem referentes a médias de 10 minutos, faz com que a análise do escoamento no mesmo exato momento ao longo do espaço, seja uma tarefa praticamente impossível. Por essa razão, optou-se por escolher alguns pontos de referência para que seja feita uma análise ao longo de todo o terreno. Esses pontos foram os de velocidade horizontal máxima, velocidade horizontal mínima, temperatura máxima e temperatura mínima. Todos estes parâmetros foram procurados à altura de 100 metros *a.n.s.*. Como os LiDAR não medem a temperatura às diferentes alturas, o único valor de temperatura medido foi por instrumentação colocada nas proximidades de cada um, os valores de temperatura máxima e mínima a 100 metros *a.n.s.* foram apenas procurados nas torres de medição. Os pontos encontrados estão na Tabela 6, e serão os pontos utilizados nesta análise.

Tabela 6 - Valores e Datas dos pontos máximos e mínimos de Velocidade e Temperatura @ 100 metros *a.n.s.*

	Valor	Dispositivo	Data
Velocidade Máxima	12,2 [m/s]	Torre n.º 29	04/06/2017, 21h20
Velocidade Mínima	0,20 [m/s]	Torre n.º 25	17/05/2017, 05h20
Temperatura Máxima	37,8 [°C]	Torre n.º 25	16/06/2017, 13h40
Temperatura Mínima	7,84 [°C]	Torre n.º 20	01/05/2017, 07h20

Para cada um destes pontos, estudou-se o perfil de velocidades correspondente a cada local e a direção média do escoamento nesses 10 minutos.

Os perfis de velocidade média lidos por cada um dos aparelhos de medição, para o dia e hora do registo da velocidade máxima, velocidade mínima, temperatura máxima e temperatura mínima, estão representados na Figura 90.

Pela análise do período com velocidade máxima (célula do canto superior esquerdo da Figura 90), é de notar uma maior velocidade no topo das colinas, em relação às velocidades lidas pelos dispositivos de medição instalados tanto no vale como no sopé exterior. É aparente, também, uma semelhança na forma dos perfis colocados em locais semelhantes, ou seja, os dispositivos colocados a mais baixas altitudes aparentam medir sensivelmente as mesmas velocidades para as mesmas alturas. A partir dos 120 metros *a.n.s.*, a velocidade no local do LiDAR 111 aumenta mais com o aumento da altura, existindo uma diferença de 2 *m/s* a 200 metros *a.n.s.*. No topo das colinas, é clara a superioridade da velocidade medida na colina Este, com a diferença entre as velocidades medidas pelas torres a aumentar com o aumento da altura. A 200 metros *a.n.s.* o Windcube mede uma velocidade de cerca de 15 *m/s*. É de notar uma maior velocidade no topo das colinas, em relação às velocidades lidas pelos dispositivos de medição instalados tanto no vale como no sopé exterior.

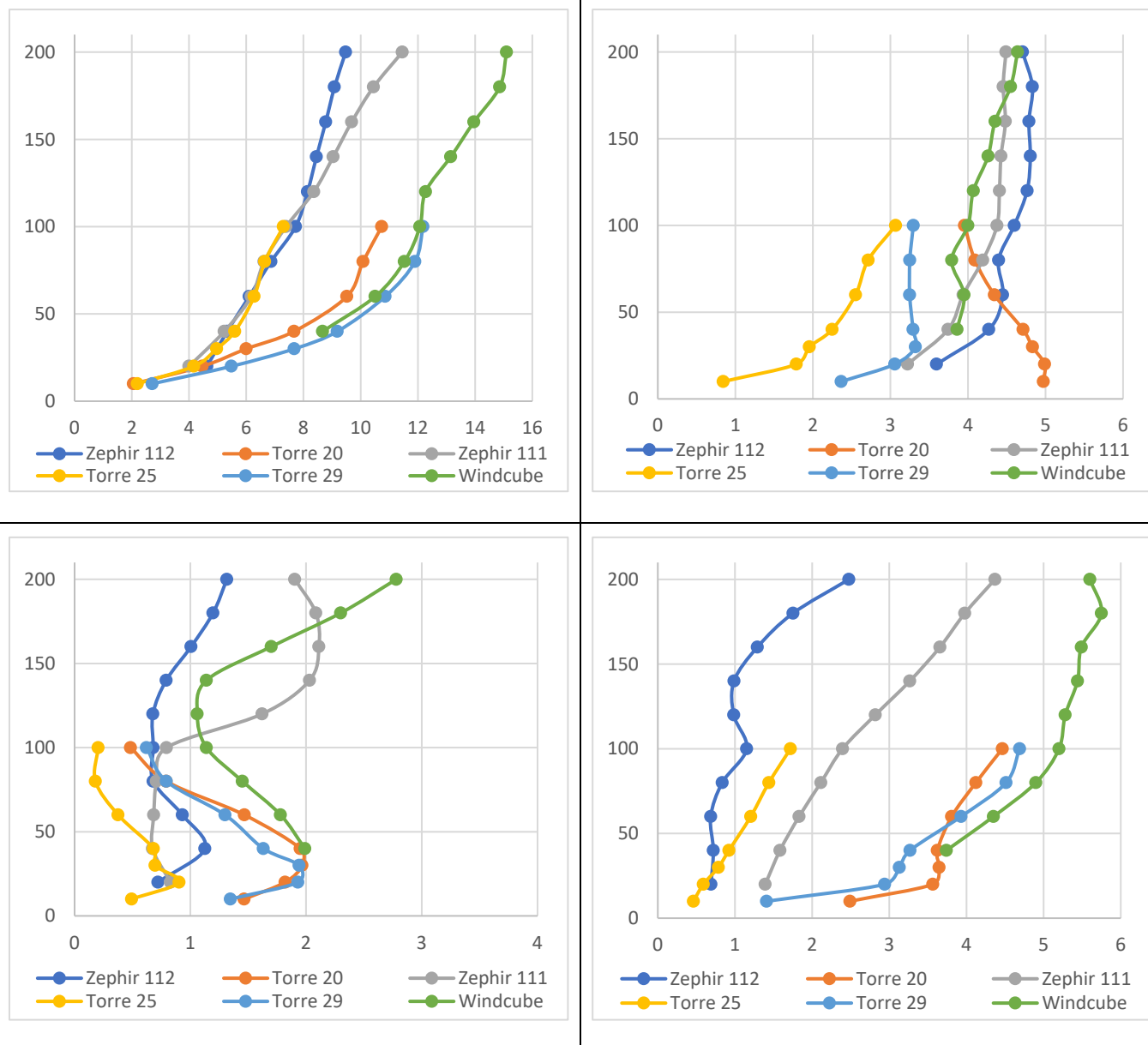


Figura 90 - Perfis de velocidade dos diferentes dispositivos de medição (Canto superior esquerdo - p/ velocidade máxima; Canto inferior esquerdo - p/ velocidade mínima; Canto superior direito - p/ temperatura máxima; Canto inferior direito - p/ temperatura mínima)

Através da análise dos perfis para o período de velocidade mínima (célula do canto inferior esquerdo da Figura 90) pode observar-se que, para esta gama de velocidades, e como já foi estudado anteriormente, o comportamento do escoamento é ditado por fenómenos térmicos e o perfil de velocidade pode mesmo inverter. As medições nas torres de medição colocadas nas colinas são semelhantes, como o eram na análise do escoamento para a velocidade máxima. No sopé das colinas a velocidade é mais baixa do que nos cumes até aos 80 metros *a.n.s.*, altura a partir da qual os LiDAR começam a ler velocidades superiores à das torres 20 e 29. Não parece, por isso, existir uma clara distinção entre zonas de velocidade mais altas e zonas de velocidades mais baixas. A complexidade dos perfis de velocidade e os baixos

valores de velocidade que lhes estão associados, tornam difícil uma análise crítica ao escoamento ao longo do terreno neste intervalo de 10 minutos.

Uma análise aos perfis associados à maior temperatura (célula do canto superior direito) e menor temperatura (célula do canto inferior direito) registadas, leva a que seja questionada a precisão e exatidão das medições remotas em períodos de elevadas temperaturas. Observando os perfis para o período de menor temperatura, são aparentes as semelhanças com os perfis de velocidade máxima. Assim, nos cumes são registados os valores máximos de velocidade, com os perfis registados pelas torres 20 e 29 a terem uma forma semelhante, enquanto que no sopé este valor é menor, com os aparelhos instalados no vale a terem uma forma semelhante entre si. Este comportamento é espectral. No entanto, se se observar os perfis medidos no período de mais alta temperatura, percebe-se que existe uma proximidade entre os valores registados pelos LiDARs, o que não seria de esperar dado que o Windcube[®] está montado no cume da colina Este, enquanto que os Zephir[®] estão colocados nos sopés. Existe, também, uma diferença considerável entre as medições da Torre 29 e do Windcube[®], bem como entre a Torre 25 e o LiDAR 111 que, apesar de não estarem tão próximos como os dois dispositivos montados no cume da colina, não seriam de esperar valores tão diferentes.

A direção do vento foi outro parâmetro analisado. Foram traçados gráficos que mostram a direção do vento às diferentes alturas de medição, representados na Figura 91.

É imediatamente aparente, através da observação dos gráficos, uma relação próxima entre as direções do vento medidas pela Torre 20 e pela Torre 29. Assim, o vento sopra sensivelmente da mesma direção no cume de ambas as colinas, exceto para o período de velocidade mínima, onde os ventos sopram de direções sensivelmente simétricas em relação ao eixo Norte-Sul. Neste período, o escoamento aparenta sofrer grandes rotações com a variação da altura ao solo. No entanto, as baixas velocidades que se fazem sentir e as discrepâncias entre medidores próximos (Torre 29 e Windcube[®]), tornam questionável quaisquer ilações tiradas da observação do gráfico de direção para o período de menor velocidade.

O escoamento, através da interação com o solo e com a sua cobertura muda de direção, não só com a variação da altura ao solo, como também ao longo de todo o terreno. A velocidade parece ser um fator determinante no que toca à rotação do escoamento em altura.

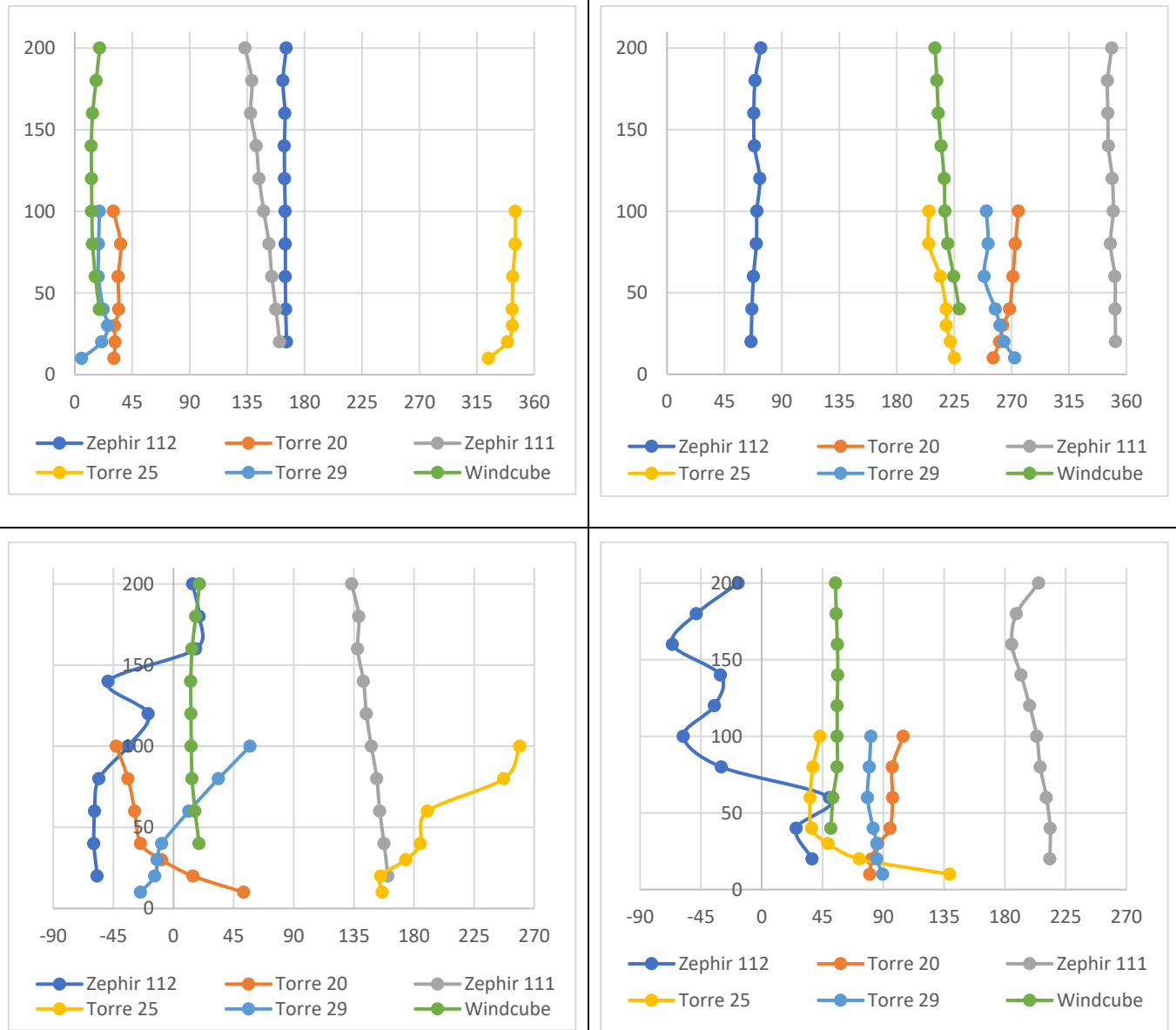


Figura 91 - Direção do vento nos diferentes dispositivos de medição (Canto superior direito - p/ velocidade máxima; Canto inferior esquerdo - p/ velocidade mínima; Canto superior direito - p/ temperatura máxima; Canto inferior direito - p/ temperatura mínima)

8. Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

8.1 Conclusões

Uma campanha de medição como a que foi aqui base de estudo, tem associada uma enorme quantidade de dados que devem ser processados. Para o processamento dos dados recolhidos foi desenvolvido código em *Python*, que provou ser a maneira mais eficiente, apesar de morosa e trabalhosa na fase inicial. A visualização de informação, no entanto, mostrou-se mais fácil através da utilização do programa Excel. O processamento dos dados em *Python* e a posterior visualização dos dados em Excel, mostrou ser um método eficiente e rápido, que poderá ser utilizado em muitas outras aplicações.

Este trabalho teve dois objetivos primários. Numa primeira fase, procurou-se analisar a capacidade de um dispositivo de medição remota medir corretamente propriedades do escoamento em terreno moderadamente complexo. Utilizaram-se, como dados de referência, as medições recolhidas na estação de medição 29. Dessa análise, concluiu-se que existe uma sobrevalorização da velocidade medida pelo LiDAR naquele local. Também a medição da direção do vento veio afetada de erro. Efetuou-se, assim, um teste de sensibilidade a variáveis ambientais, na tentativa de compreender que parâmetros poderiam ser responsáveis pelo desvio observado. Os resultados desse teste mostraram que as medições do Windcube® são afetadas pela temperatura, gradiente de temperatura, rotação em altura, humidade relativa, *shear factor* e intensidade de turbulência. Concluiu-se, assim, que a utilização destes dispositivos no estudo de escoamentos em terreno moderadamente complexo ainda necessita de novos estudos e novos métodos que permitam que estes erros de leitura sejam eliminados.

Tinha-se como outro objetivo a análise do escoamento ao longo do terreno. Os dados de vento recolhidos durante a campanha de medição apontam para um local que, pelo menos durante o período observado, é caracterizado por um escoamento de baixa velocidade. Isto dificultou a análise do efeito de algumas características topográficas porque, para estas velocidades, muitas vezes abaixo dos 3 m/s, o comportamento do escoamento é ditado por fenómenos térmicos e não mecânicos. No entanto, mediram-se velocidades mais elevadas nos cumes e mais baixas nos sopés das colinas.

A influência da componente térmica no escoamento foi visível no valor do *shear factor* que é geralmente maior durante o período noturno. Também a rotação em altura é maior durante o período noturno, o que leva a concluir que ambos os parâmetros estão intrinsecamente ligados ao gradiente de temperatura e à estabilidade atmosférica que lhe está associada. Esta ligação foi, no entanto, sempre potenciada pelas baixas velocidades que se fizeram sentir.

Através da análise da inclinação do escoamento, é possível perceber como é feito o acompanhamento da topografia do solo por parte do vento, e como é que esse acompanhamento varia com o aumento da altura ao solo. Concluiu-se que o acompanhamento do relevo acontece até alturas de sensivelmente 30 metros *a.n.s.* quando o escoamento passa junto ao sopé das colinas. Nos topos, é possível ver a influência da topografia até alturas muito maiores. Isto será causado não só pela grande diferença entre as proeminências do solo e as colinas propriamente ditas, mas também pela própria velocidade e maior inércia associada ao escoamento nos cumes.

A análise do índice de turbulência nos diversos pontos de medição suscitou dúvidas. Observou-se, em todos os locais, um aumento da intensidade de turbulência com a aproximação ao solo. No entanto, os valores de índice de turbulência e a forma como este parâmetro evoluiu com a velocidade horizontal é diferente do comum na indústria da Energia Eólica.

8.2 Trabalhos futuros

Pela restrição de tempo associada a um trabalho deste tipo, não foi possível a realização de todas as tarefas que se gostariam de ter feito, tendo algumas que ficar necessariamente para trabalhos futuros.

Para a abertura, manipulação e processamento dos dados desenvolveu-se um código em *Python*. Seria interessante a otimização desse código, de forma a que corresse mais rápido e mais eficientemente, e que pudesse ser aplicado a mais situações e estudos sobre o escoamento atmosférico.

Poder-se-ia, também, comparar as conclusões tiradas através desta análise com os resultados obtidos através da utilização de modelos de escoamento atmosférico.

Utilizaram-se, neste trabalho, as medições recolhidas por seis dispositivos diferentes. Num trabalho futuro, poderia ser interessante a adição de medições tiradas por outros dispositivos à análise do escoamento. Por exemplo, seria interessante a utilização dos dados do LiDAR colocado na encosta da colina para medir e perceber a forma como o escoamento acompanha a variação acentuada de declive causada pela presença da colina.

Foi necessário arbitrar, com base na literatura e conhecimento empírico, valores utilizados como referência na filtragem dos dados (desvio padrão inferior a 5 m/s, por exemplo). Poderia ser relevante perceber de que forma a alteração desses valores influencia a caracterização do escoamento. Poderia ser também relevante a análise do efeito da presença da torre de medição nas leituras dos próprios anemómetros montados na torre. Poderá existir um efeito de esteira, o que pode afetar as medições dos anemómetros sónicos. Perceber se isso acontece e quantificar a influência da torre, poderiam ser a base para um trabalho futuro.

Seria conveniente estudar qual o efeito de outros fatores no escoamento neste local. Neste trabalho estudou-se o efeito da temperatura, mas seria relevante um estudo sobre o efeito de outros fatores como a pressão e a humidade relativa, por exemplo. Seria, também, interessante perceber mais aprofundadamente qual o efeito das variáveis ambientais nas medições dos LiDAR, de que forma estas variáveis afastam ou aproximam da realidade as medições destes dispositivos.

Poderiam ser utilizados outros intervalos representativos dos períodos diurno e noturno. Seria interessante perceber de que forma a alteração destes intervalos influenciaria a caracterização do escoamento diurno e noturno.

Neste trabalho foi apenas analisada uma linha ao longo do terreno. Validada esta forma de análise do escoamento, seria interessante fazer uma análise de campo mais aprofundada, que procurasse relações entre as propriedades do escoamento em diversos locais. Para isso seria necessário o estudo de mais pontos lidos em tempos concorrentes e a utilização de outros parâmetros para a procura dessas relações. Seria relevante a utilização de *machine learning* na análise do escoamento neste e outros locais. A sofisticação de alguns *softwares* e o poder de processamento dos computadores atuais, poderia permitir a detecção de relações entre diversos parâmetros do vento e até mesmo entre características do escoamento em diversos pontos do local estudado.

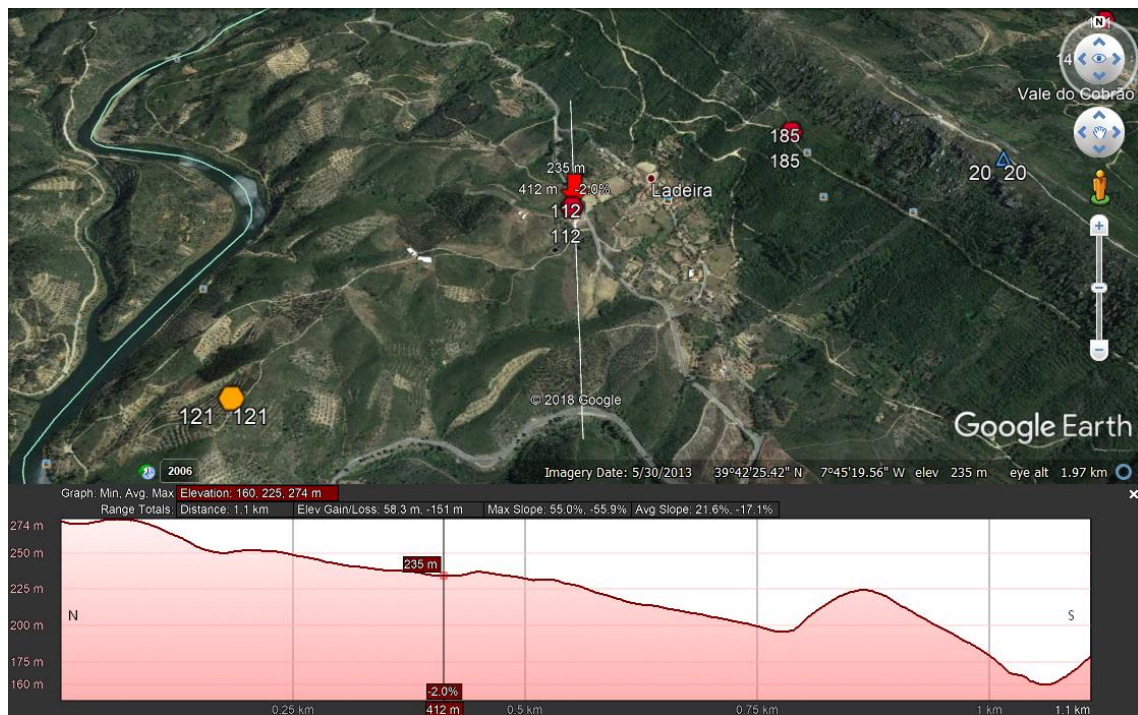
9. Referências

1. Hansen, M.O.L., *Aerodynamics of Wind Turbines*. 2015: Taylor & Francis.
2. Lang, S. and E. McKeogh, *LIDAR and SODAR Measurements of Wind Speed and Direction in Upland Terrain for Wind Energy Purposes*. 2011. **3**: p. 1871-1901.
3. Troen, I., et al., *European Wind Atlas*. 1989: Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research, and Development, Brussels, Belgium.
4. Bailey, D.T., *Meteorological monitoring guidance for regulatory modeling applications*. 2000: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards.
5. Weitkamp, C., *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. 2006: Springer New York.
6. Simley, E., et al., *Analysis of light detection and ranging wind speed measurements for wind turbine control*. *Wind Energy*, 2014. **17**(3): p. 413-433.
7. Wagner, R.M., Torben; Courtney, Michael, *Investigation of turbulence measurements with a continuous wave, conically scanning LiDAR*, in *Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi*. 2009.
8. Pindado, S., J. Cubas, and F. Sorribes-Palmer, *The Cup Anemometer, a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute*. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2014. **14**(11): p. 21418-21452.
9. Kaimal, J.C., *Sonic Anemometer Measurement of Atmospheric Turbulence*, in *Proceedings of the Dynamic Flow Conference 1978 on Dynamic Measurements in Unsteady Flows*, B.W. Hansen, Editor. 1978, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 551-565.
10. Center of Atmospheric Science - University of Manchester. *Sonic Anemometers*. [cited 2017 27 December]; Available from: <http://www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/meteorology/sonic/>.
11. Applied Technologies, I. *Sonic Thermometry*. [cited 2017 28 December]; Available from: <http://www.apptech.com/wp-content/uploads/2016/04/sonic-thermometry.pdf>.
12. Wagner, R., et al., *Accounting for the speed shear in wind turbine power performance measurement*. *Wind Energy*, 2011. **14**(8): p. 993-1004.

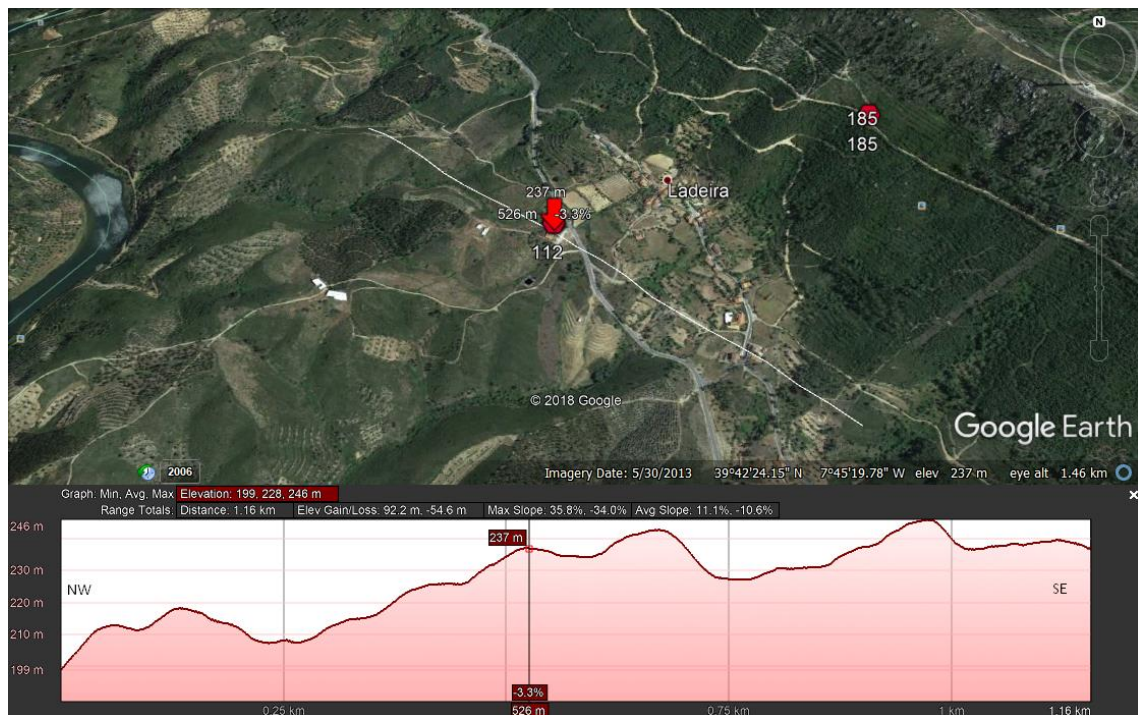
13. Incorporated, T. *TURBULENCE INTENSITY MEASUREMENTS APPLICABLE INSTRUMENT MODELS: 9555, 9565, 7565, 7575, TA460, TA465, EBT730, PH730, 8715*. 2012 [cited 2017 15-12-2017]; Available from: <http://www.tsi.com/uploadedFiles/Site Root/Products/Literature/Application Notes/TSI-141-A4.pdf>.
14. Devesa, R.S.R.d., *Caraterização do Escoamento Atmosférico em Terreno Complexo com Dispositivo de Medição Remota LiDAR*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2017, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
15. Commission, I.E., *IEC 61400-12-1: Wind energy generation systems, in Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. 2016.
16. M.L. Ray, A.L.R., and J.G. McGowan *Analysis of wind shear models and trends in different terrains in Windpower 2006 Conference and Exhibition*. 2006, University of Massachusetts, Department of Mechanical & Industrial Engineering, Renewable Energy Research Laboratory, Amherst, MA 01003
17. Halblaub, J., *Daily Wind Changes in the Lower Levels of the Atmosphere*. National Weather Service - The Front, 2014.

ANEXO A: Cortes do terreno e análise topográfica

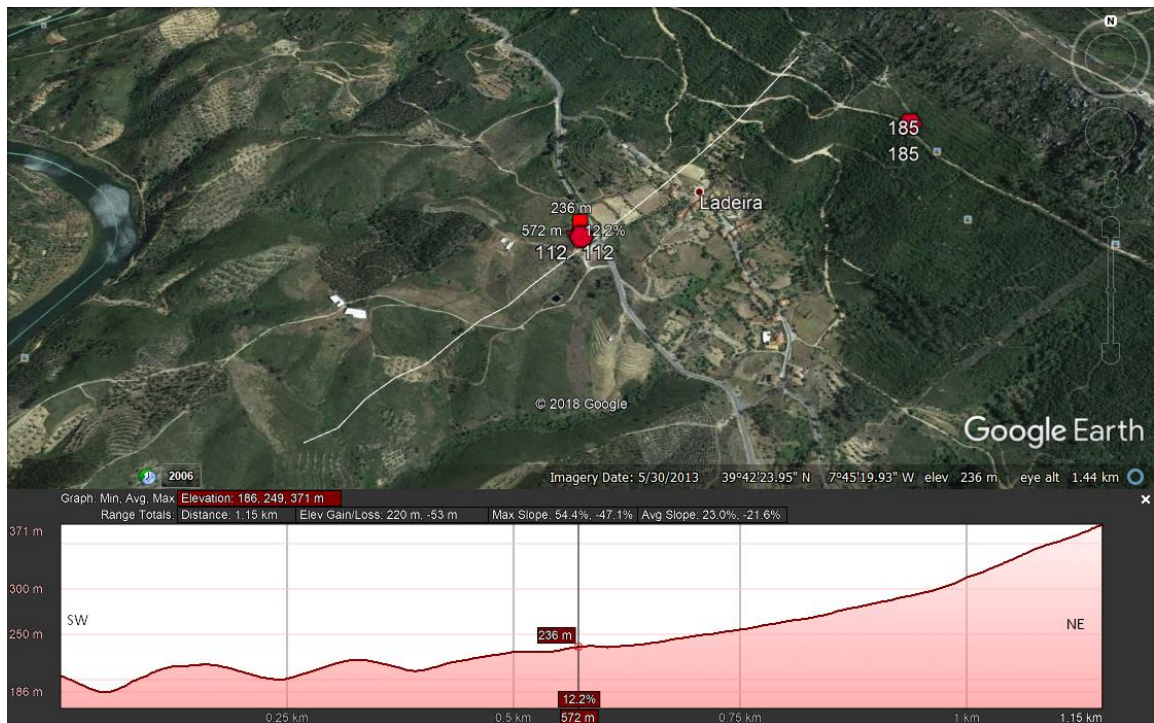
LiDAR Zephyr® 112: Corte Norte - Sul



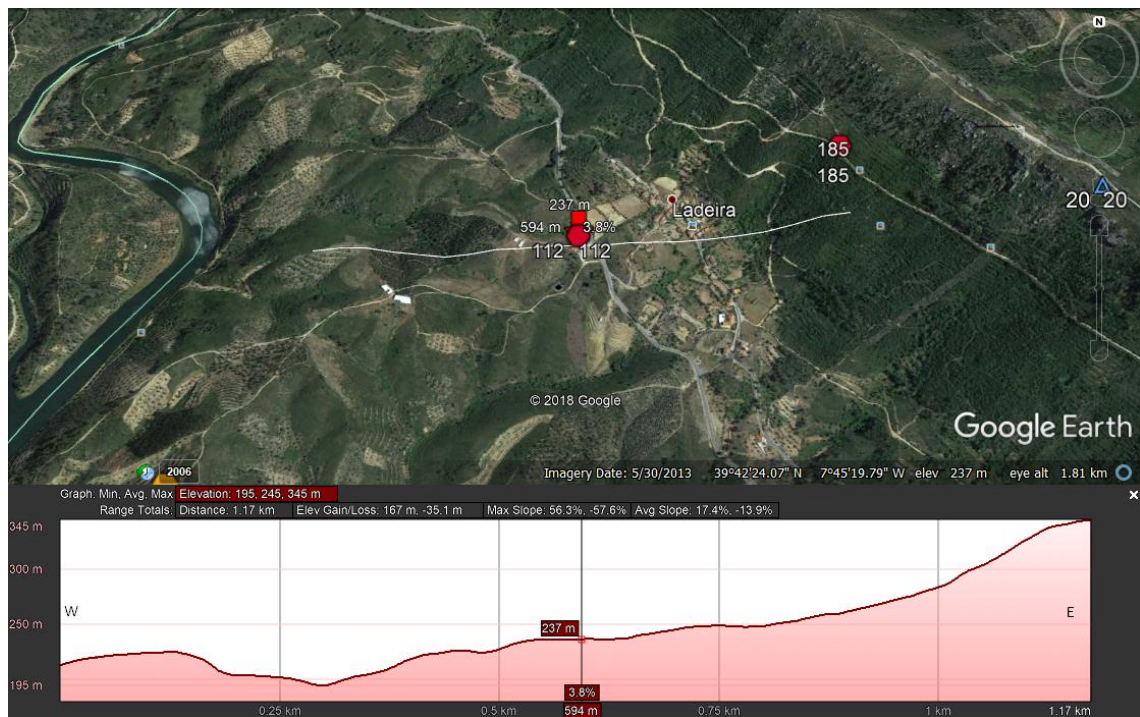
LiDAR Zephyr® 112: Corte Noroeste – Sudeste



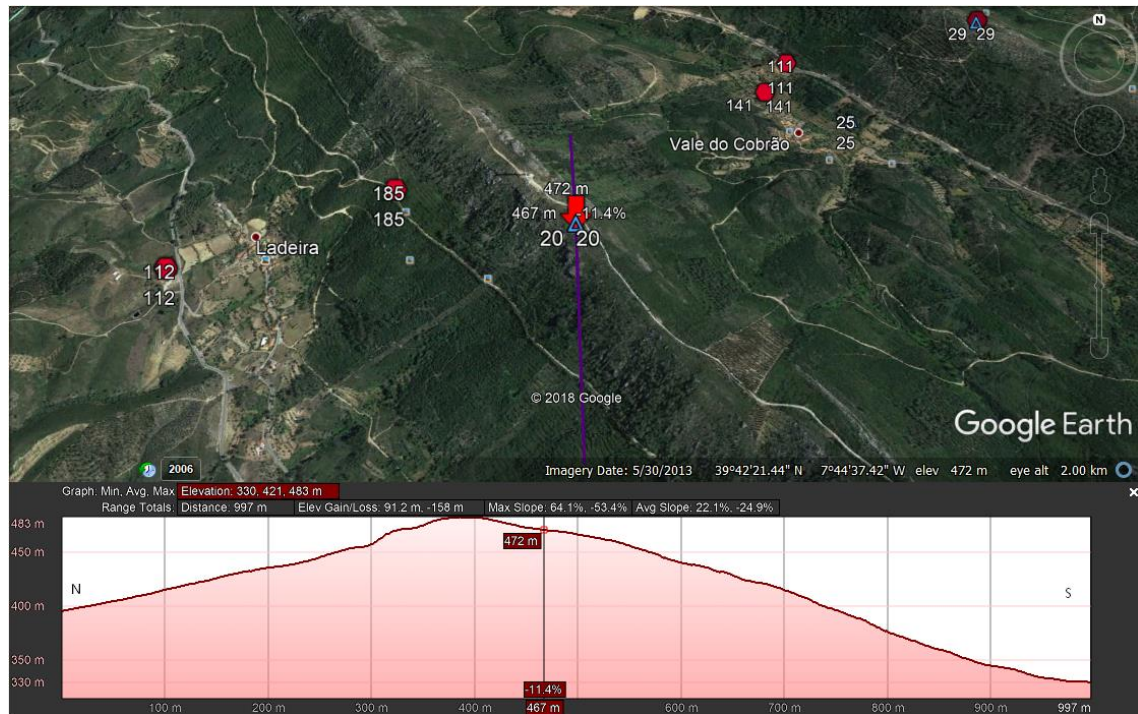
LiDAR Zephyr® 112: Corte Sudoeste – Nordeste



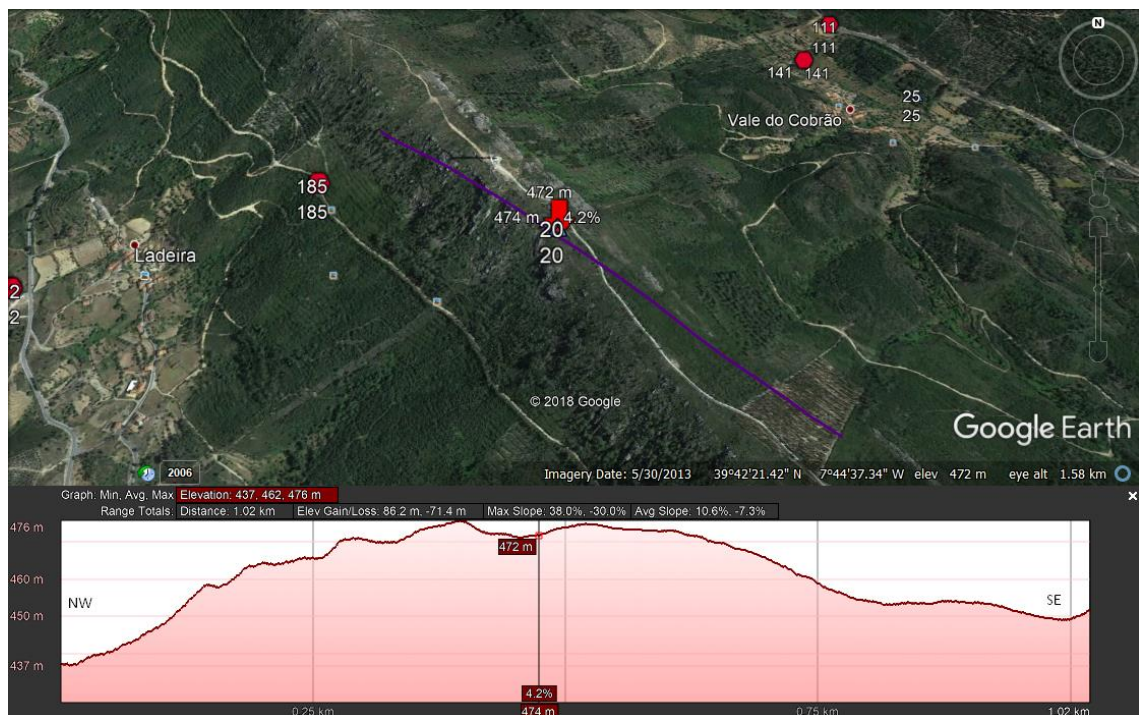
LiDAR Zephyr® 112: Corte Oeste – Este



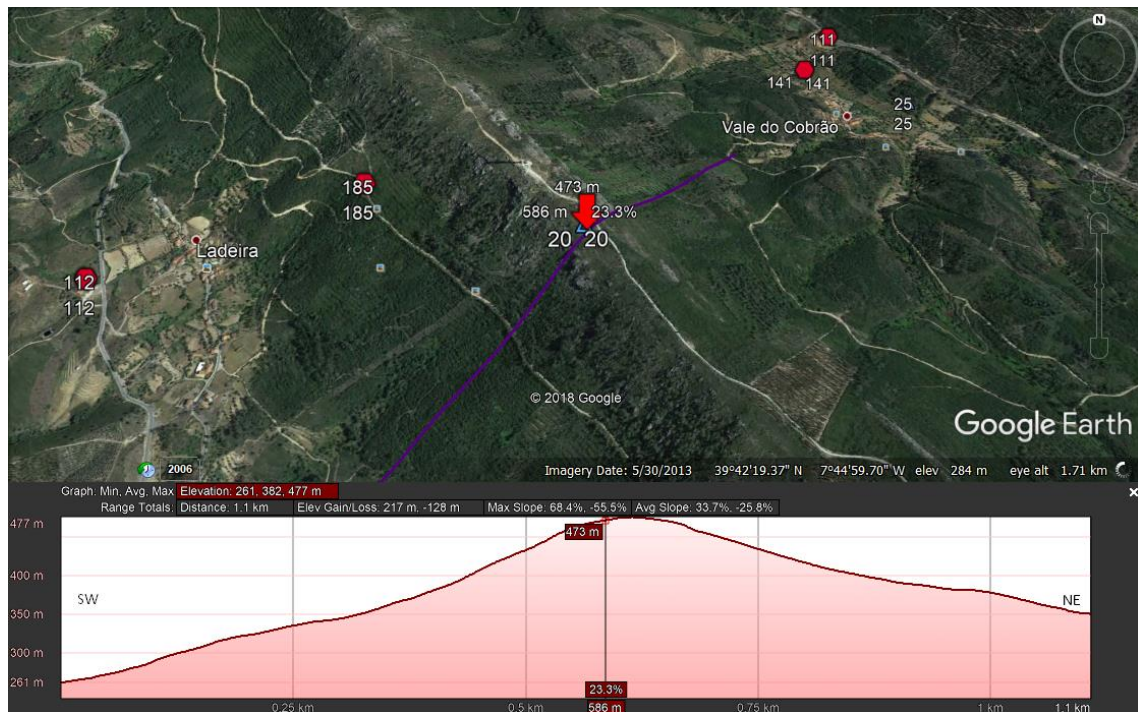
Estação de Medição n.º 20: Corte Norte – Sul



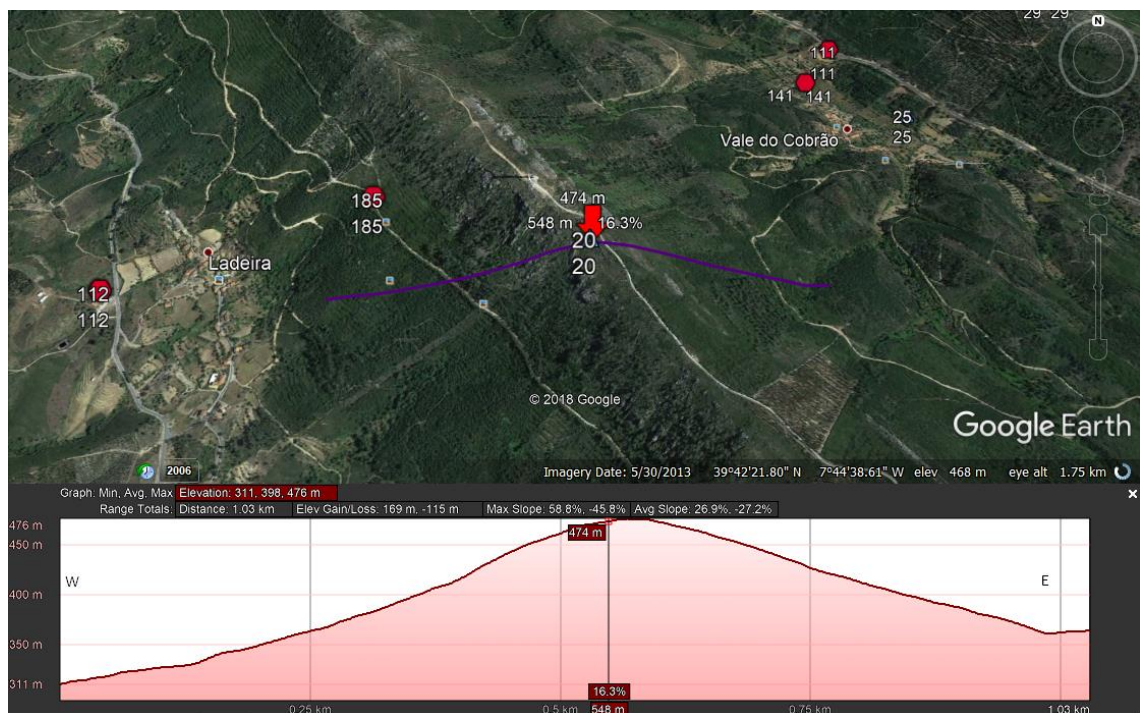
Estação de Medição n.º 20: Corte Noroeste – Sudeste



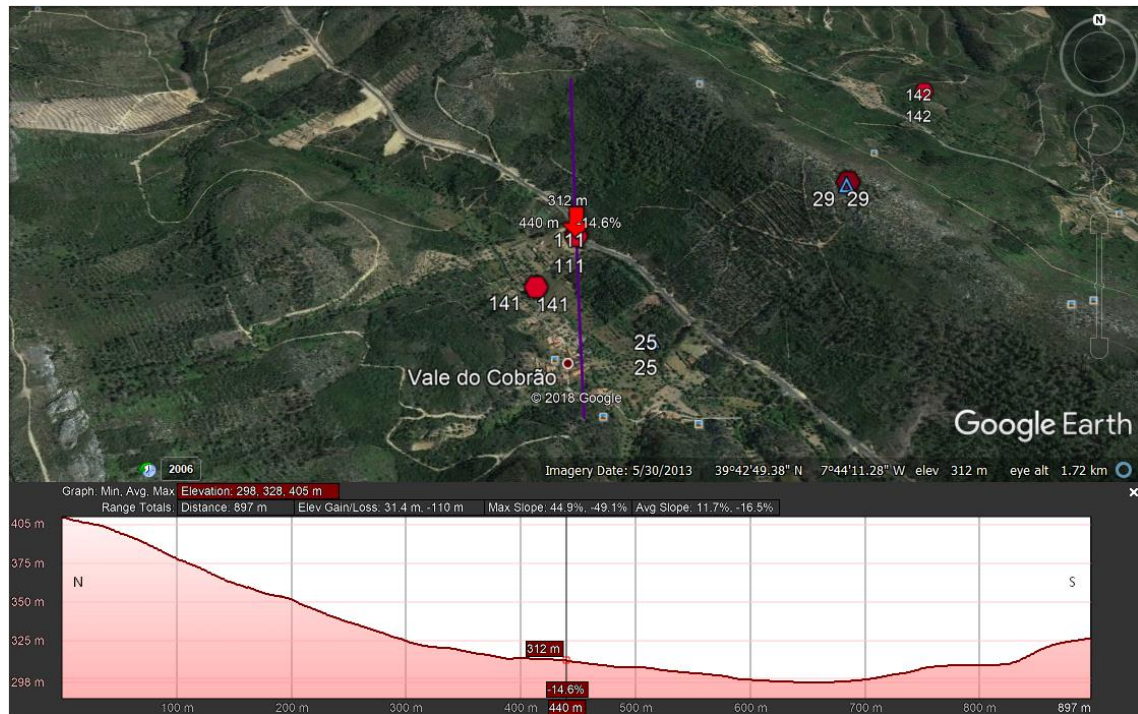
Estação de Medição n.º 20: Corte Sudoeste – Nordeste



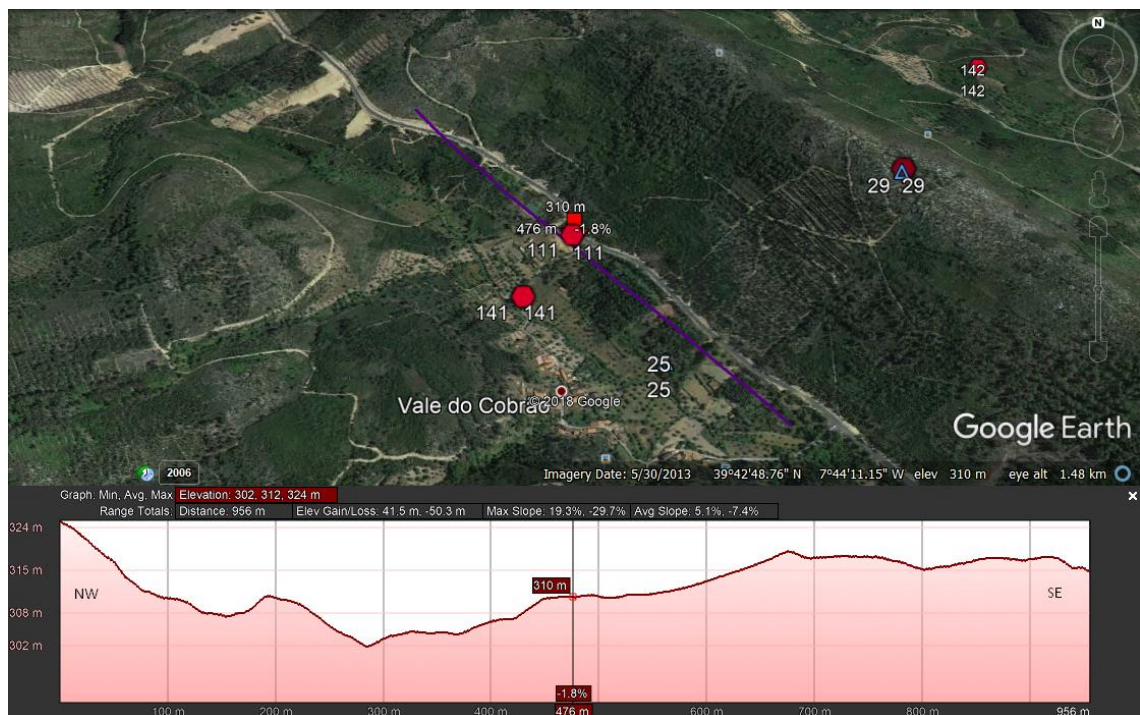
Estação de Medição n.º 20: Corte Oeste - Este



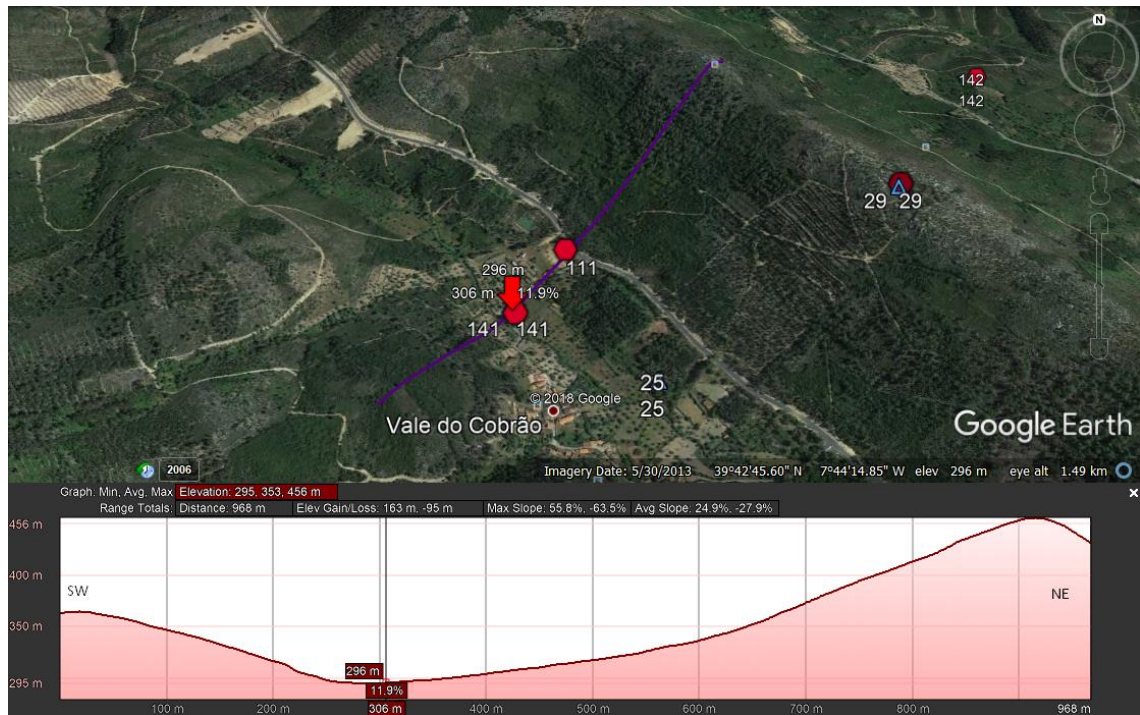
LiDAR Zephyr® 111: Corte Norte – Sul



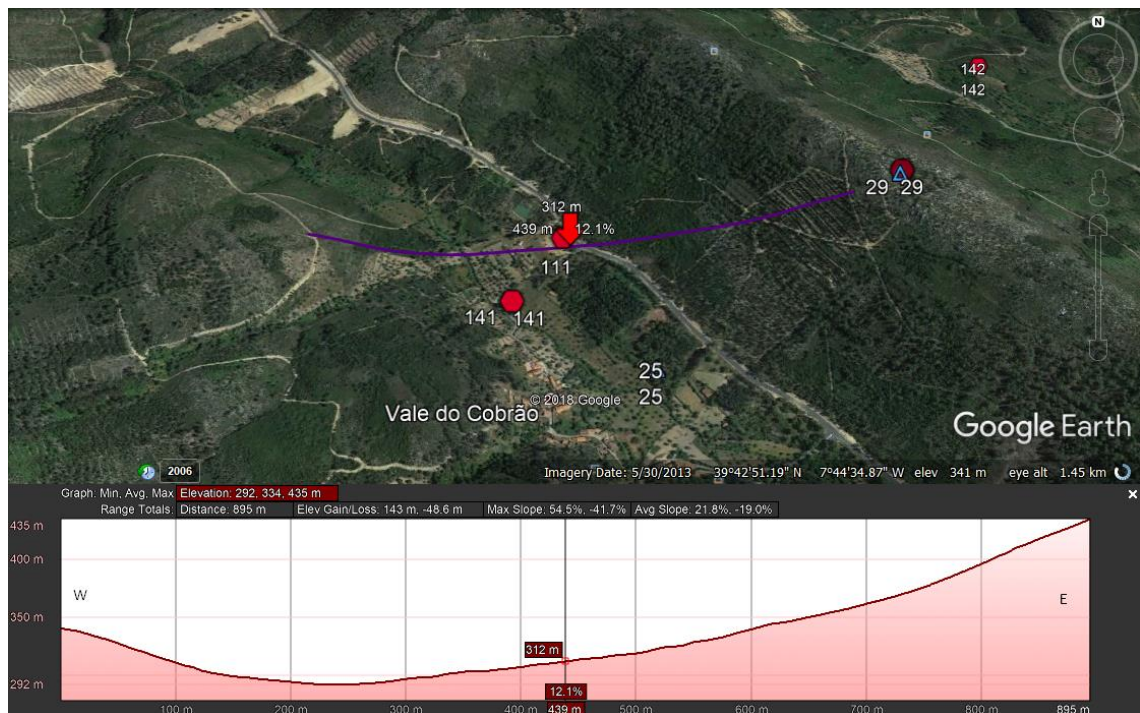
LiDAR Zephyr® 111: Corte Noroeste – Sudeste



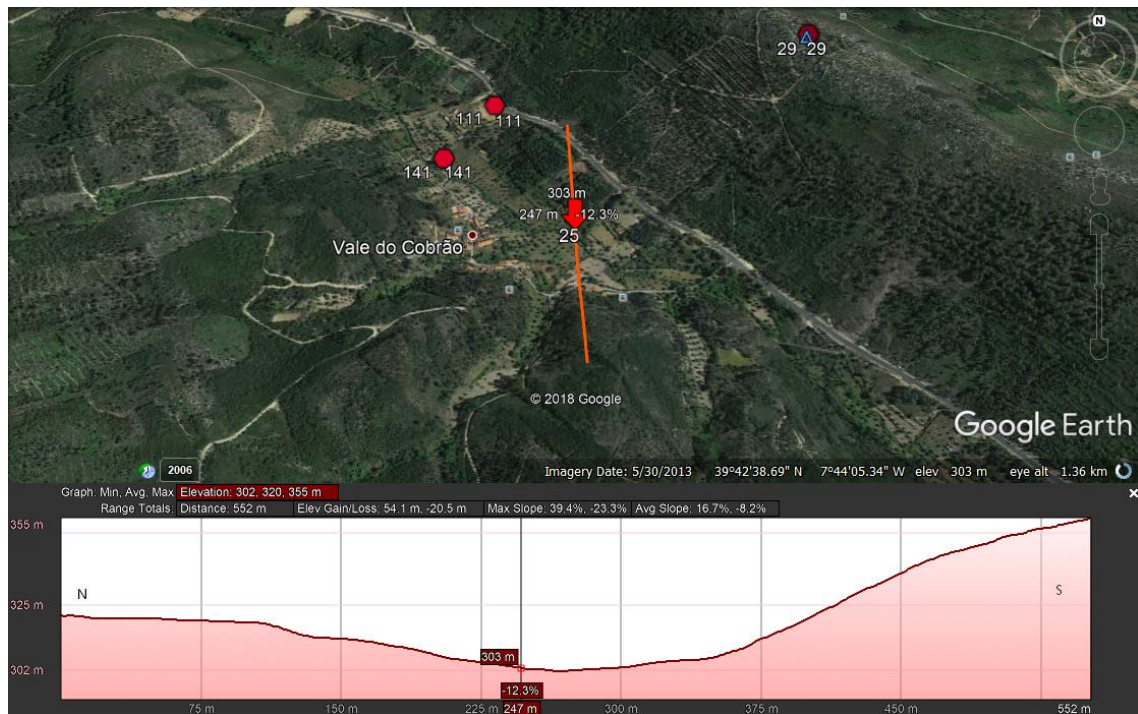
LiDAR Zephyr® 111: Corte Sudoeste – Nordeste



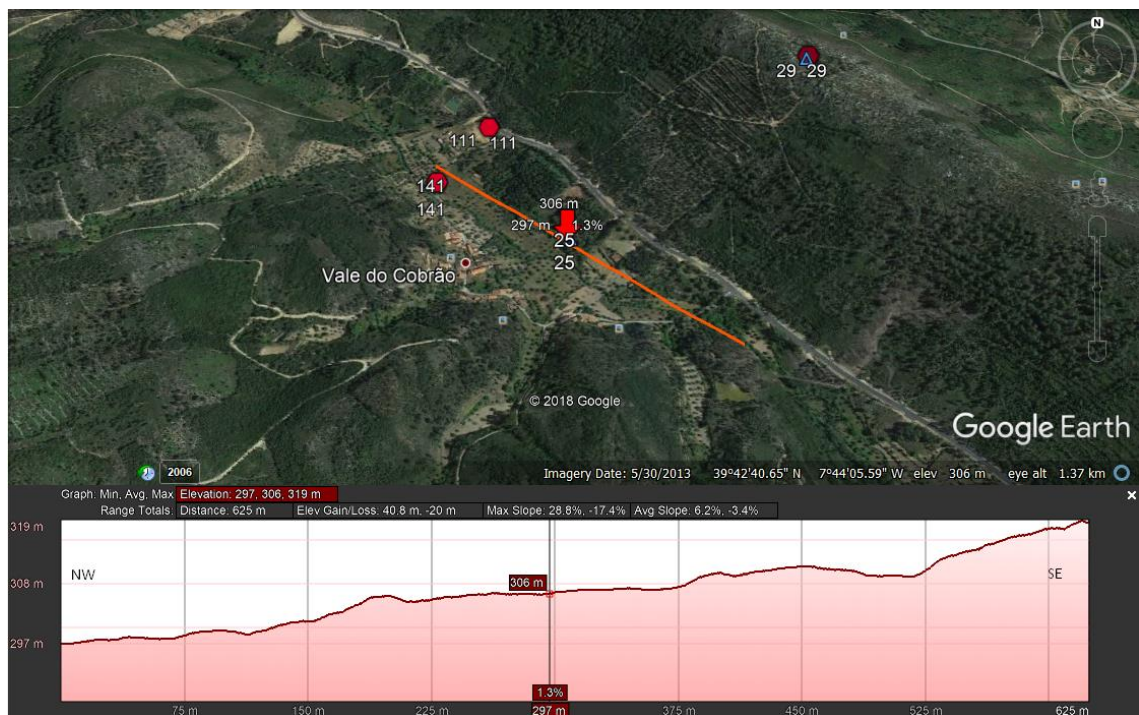
LiDAR Zephir® 111: Corte Oeste - Este



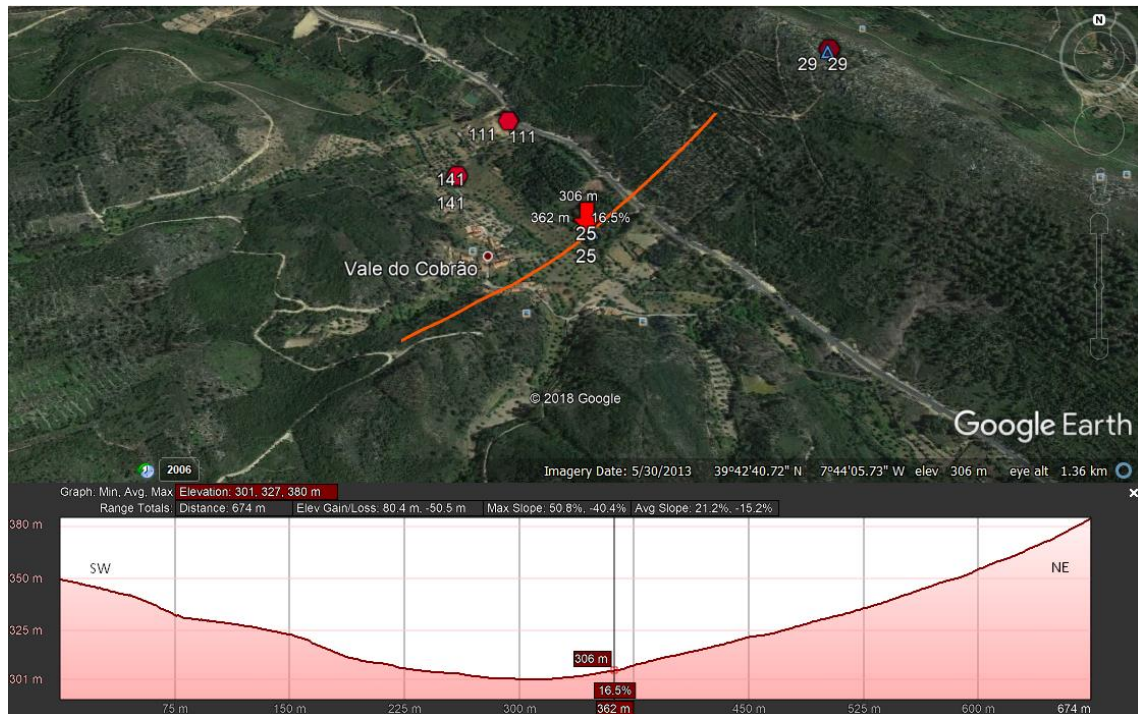
Estação de Medição n.º 25: Corte Norte – Sul



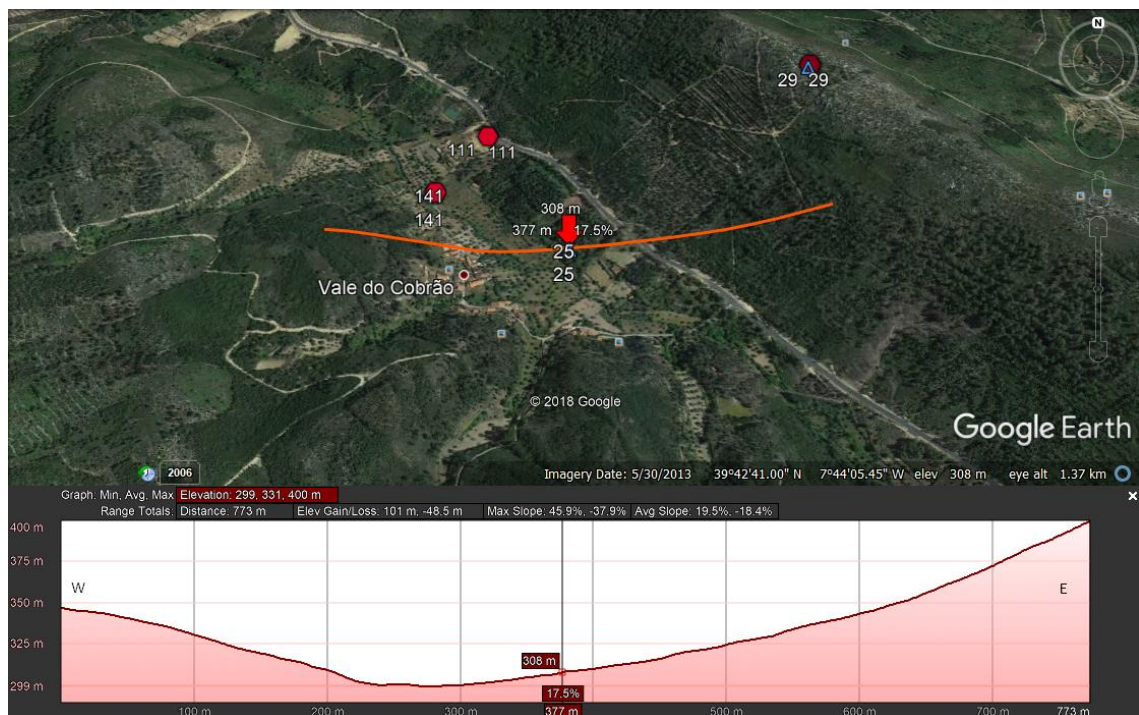
Estação de Medição n.º 25: Corte Noroeste – Sudeste



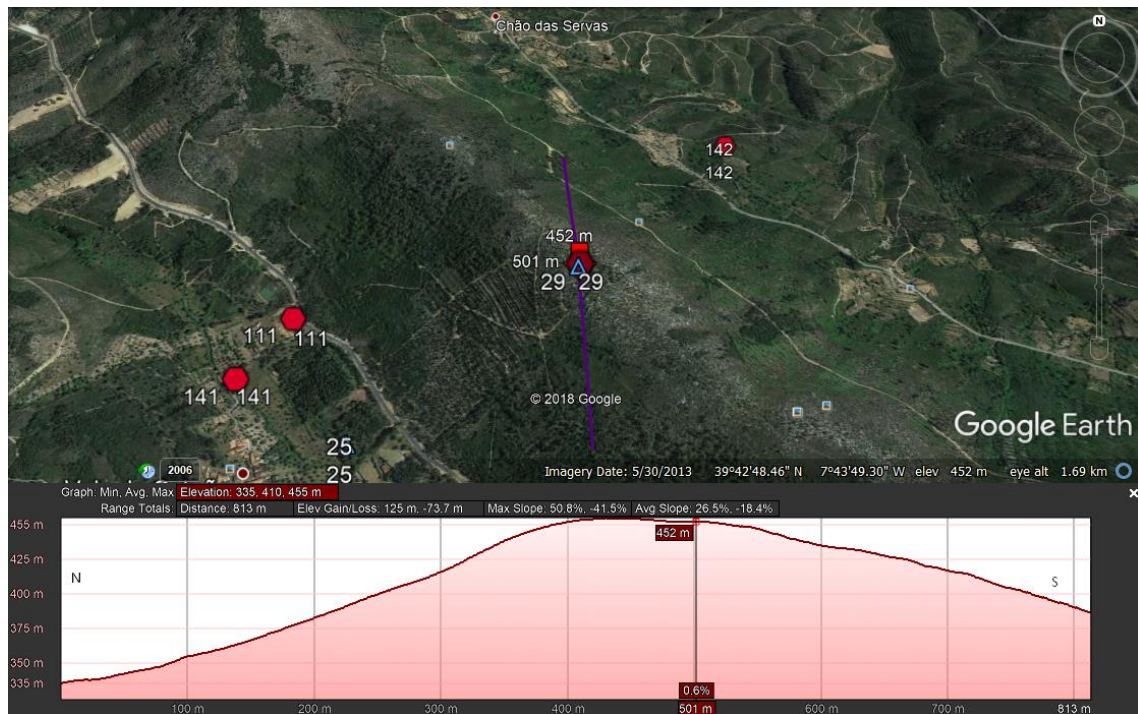
Estação de Medição n.º 25: Corte Sudoeste – Nordeste



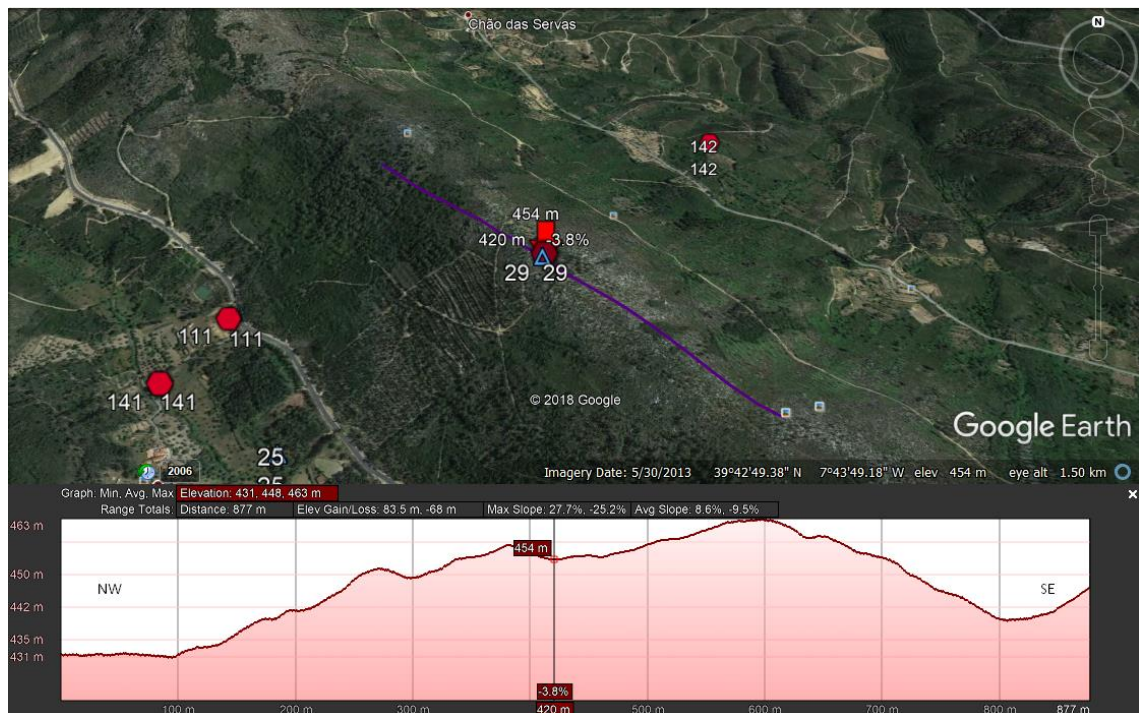
Estação de Medição n.º 25: Corte Oeste - Este



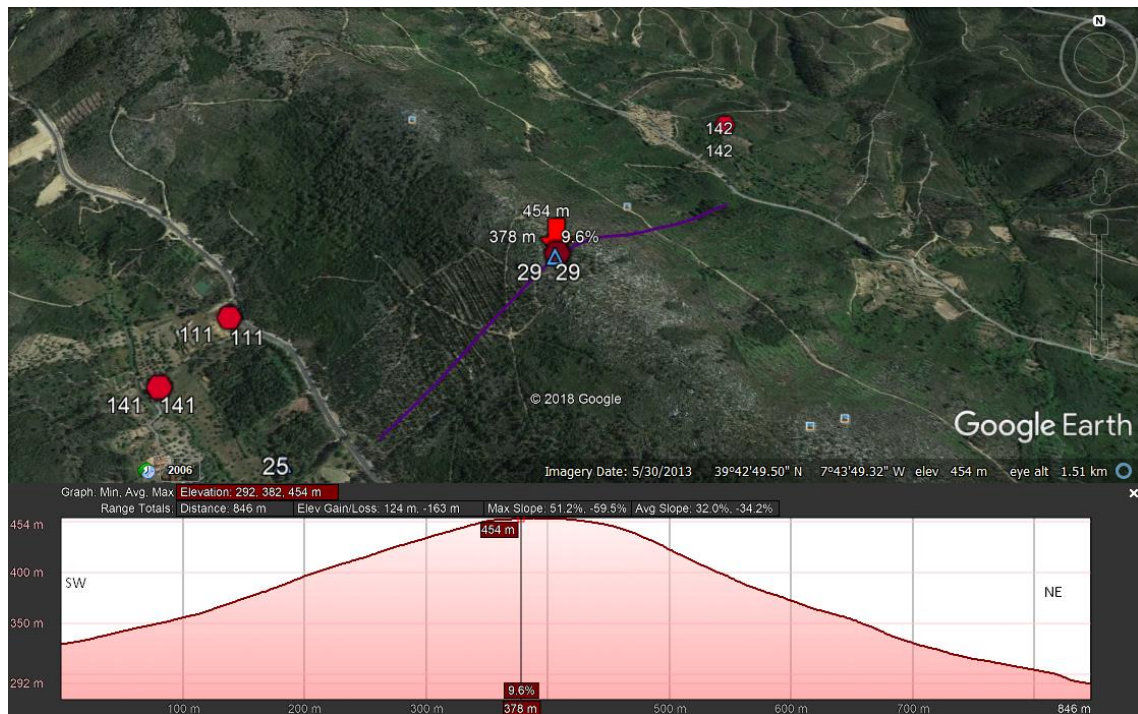
Estação de Medição n.º 29 e Windcube®: Corte Norte – Sul



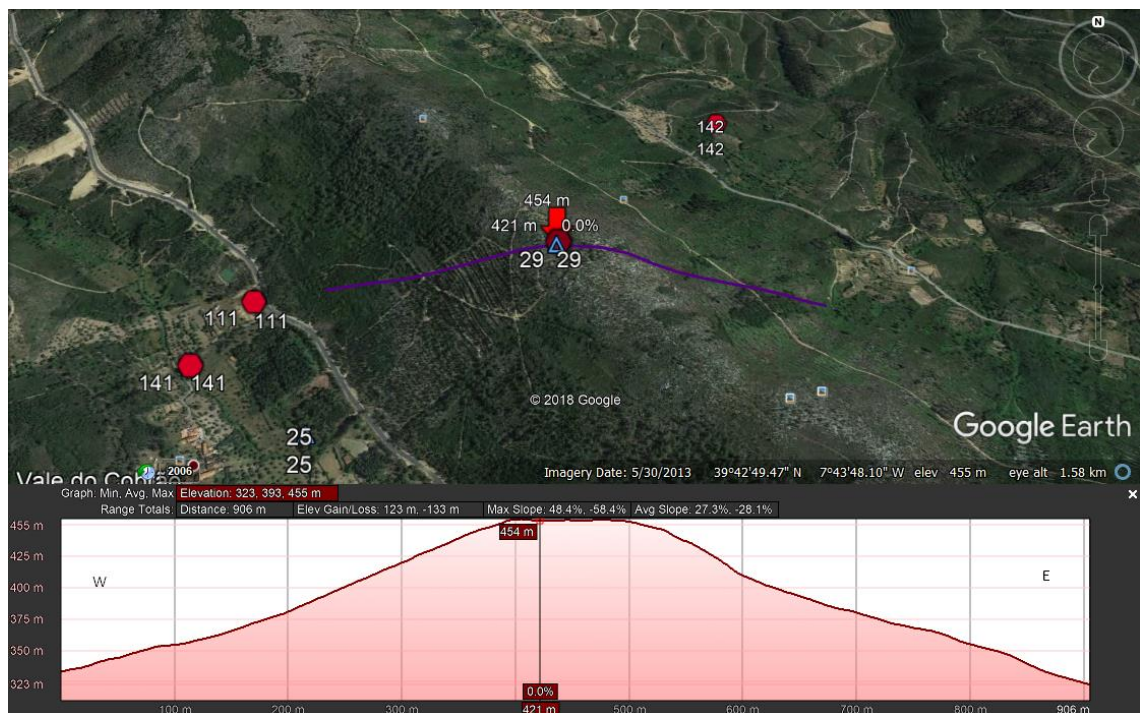
Estação de Medição n.º 29 e Windcube®: Corte Noroeste – Sudeste



Estação de Medição n.º 29 e Windcube®: Corte Sudoeste – Nordeste

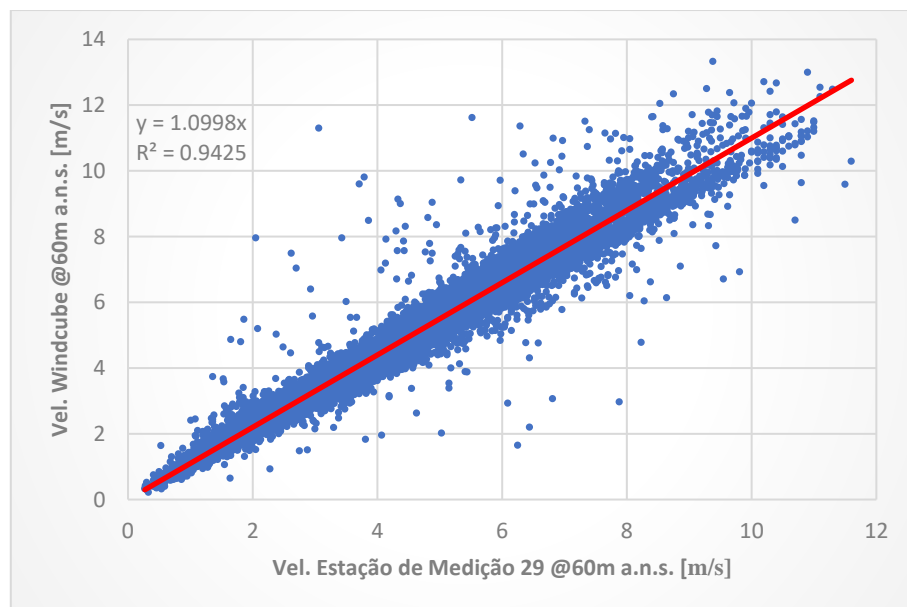
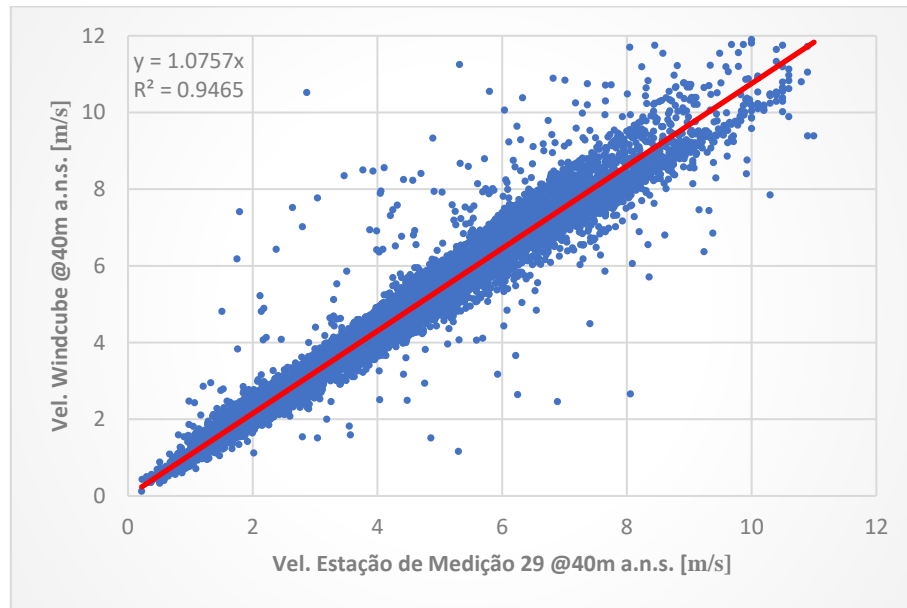


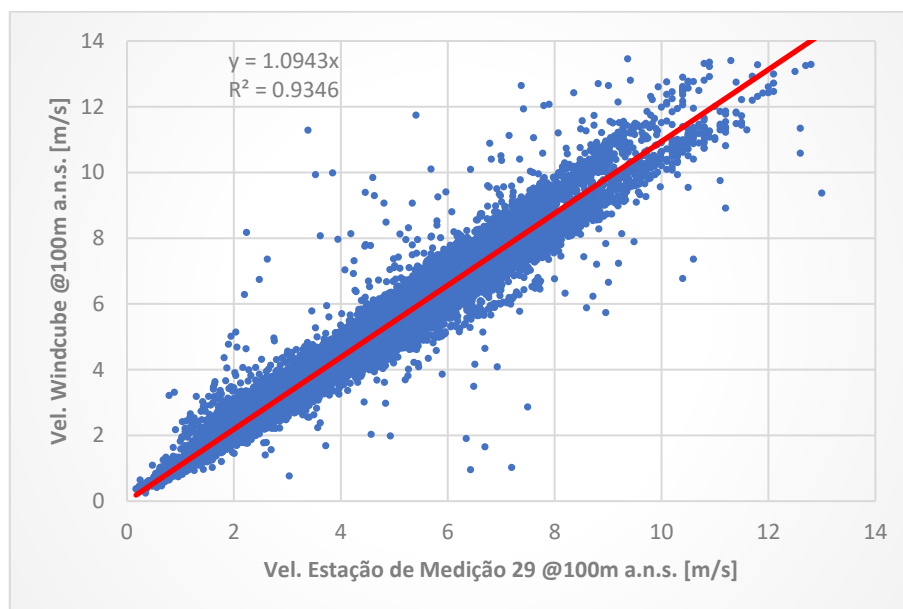
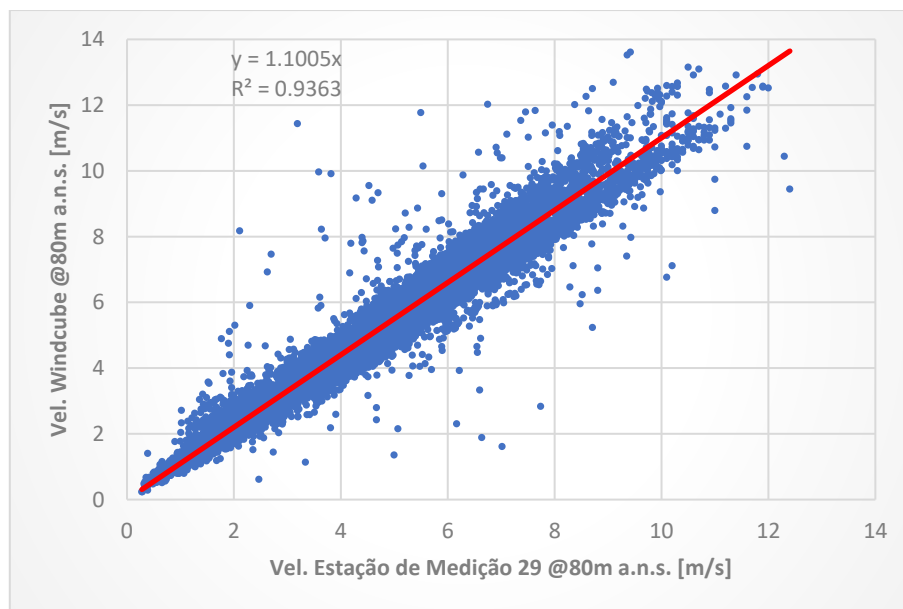
Estação de Medição n.º 29 e Windcube®: Corte Oeste - Este



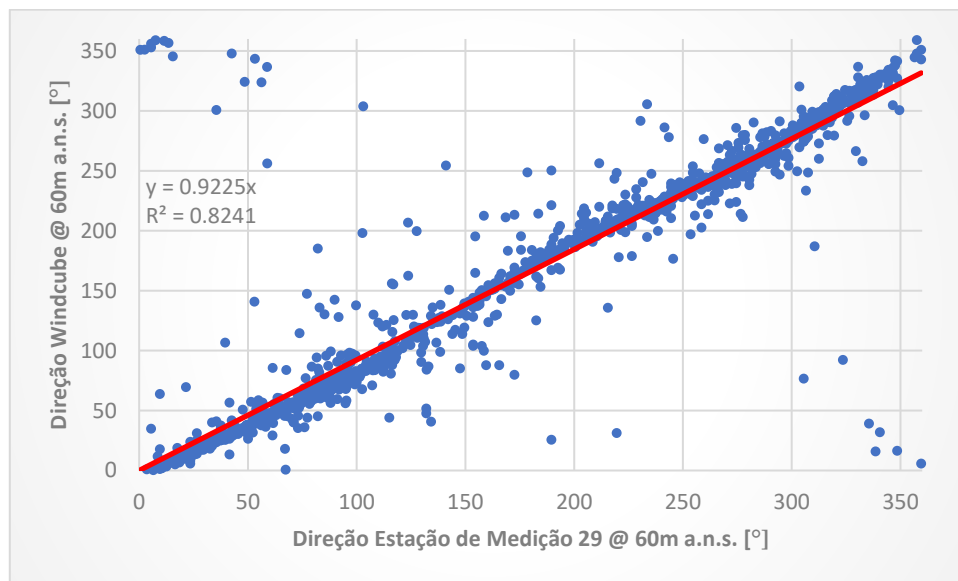
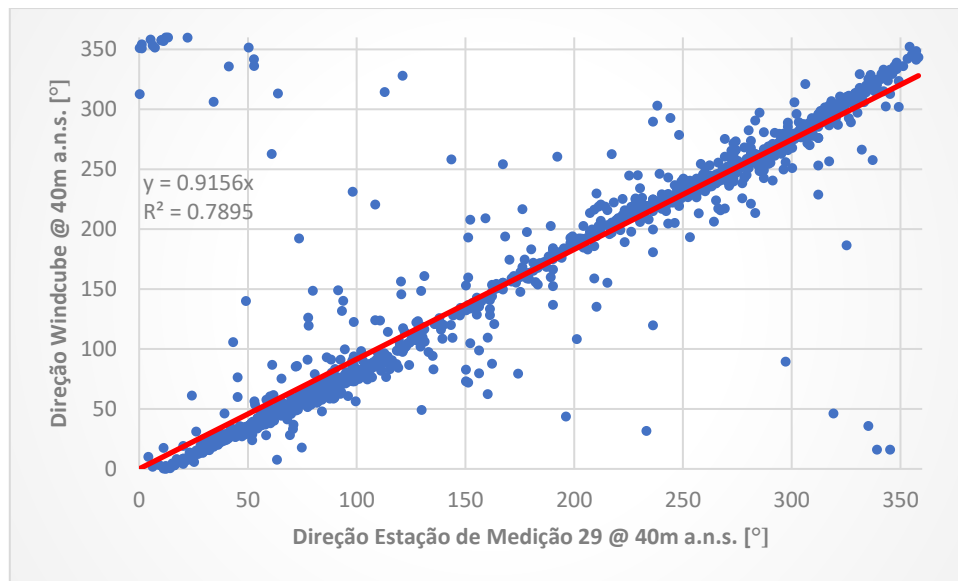
ANEXO B: Comparação entre medições no Windcube® e na Estação de Medição 29

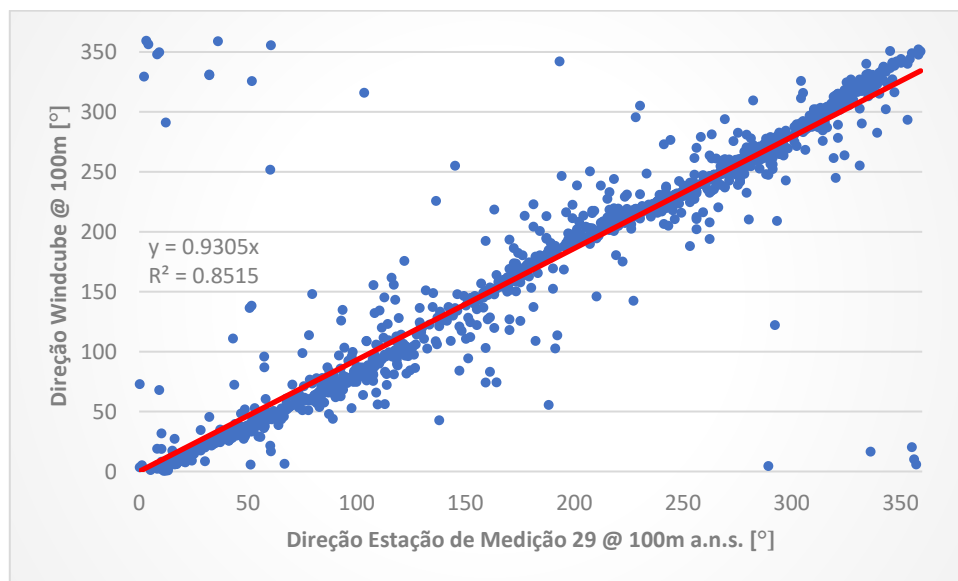
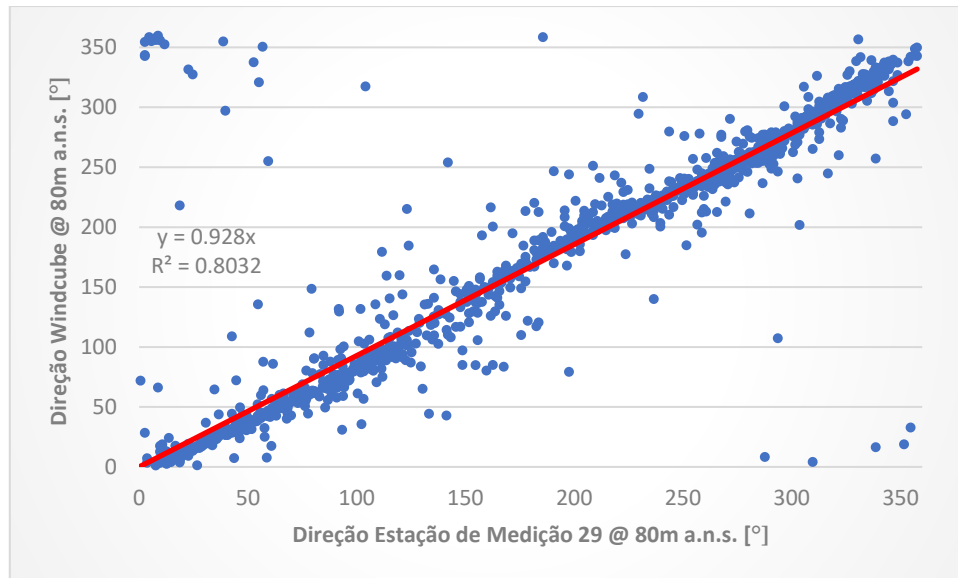
Velocidade lida pelo LiDAR *versus* velocidade lida na Estação de Medição 29



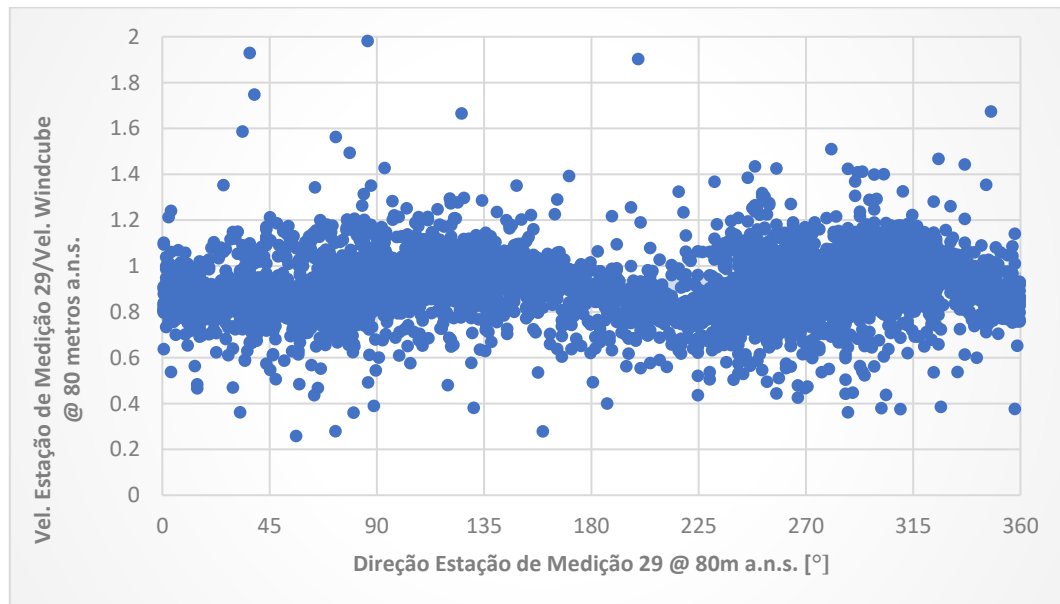
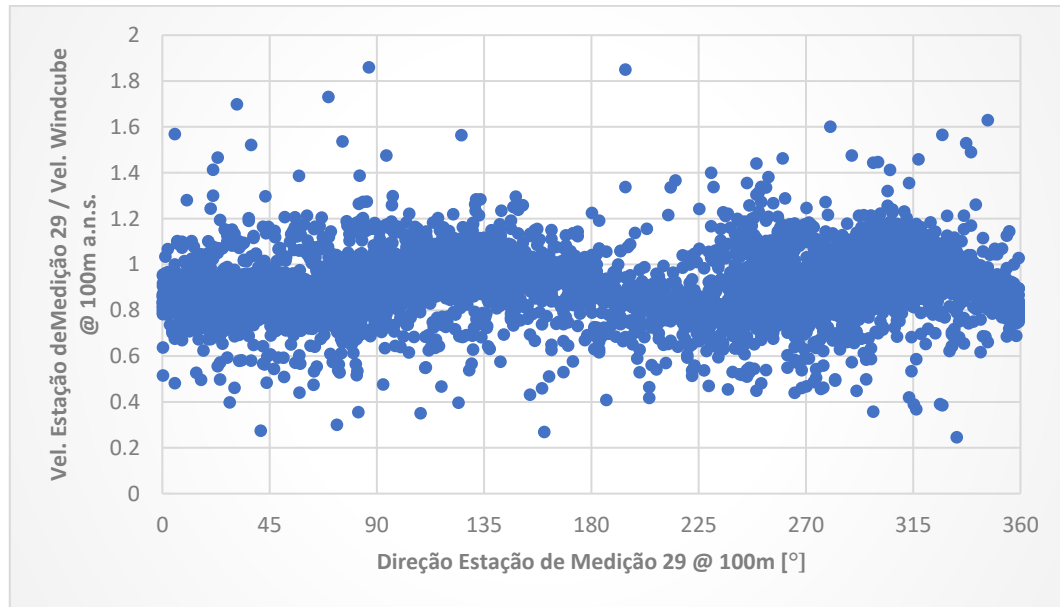


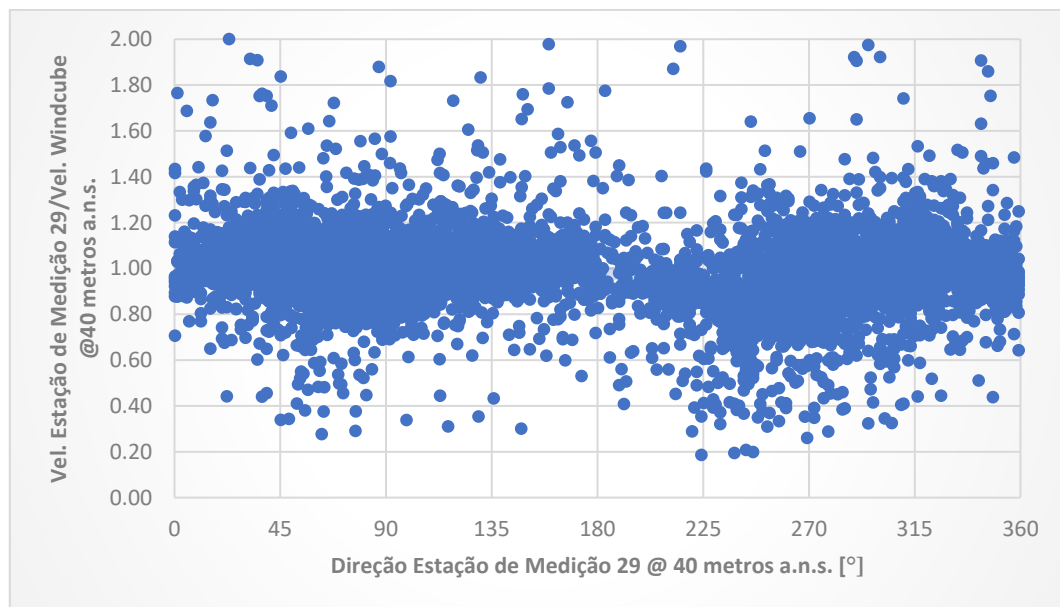
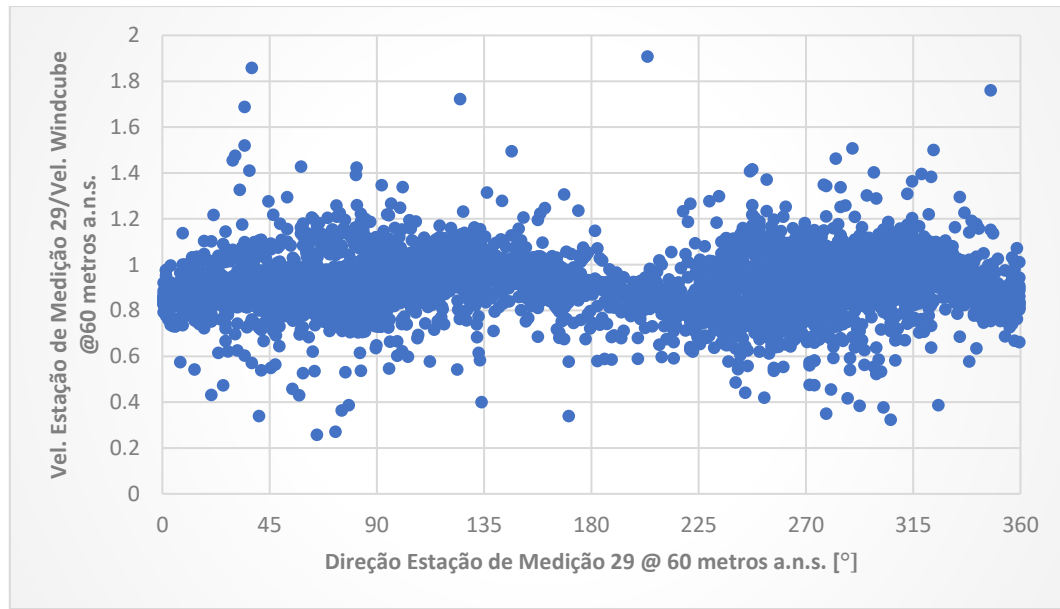
Direção lida pelo LiDAR versus direção lida na Estação de Medição 29.





Razão entre as velocidades lidas pela Estação de Medição 29 e o LiDAR *versus* direção lida na Estação de Medição 29.





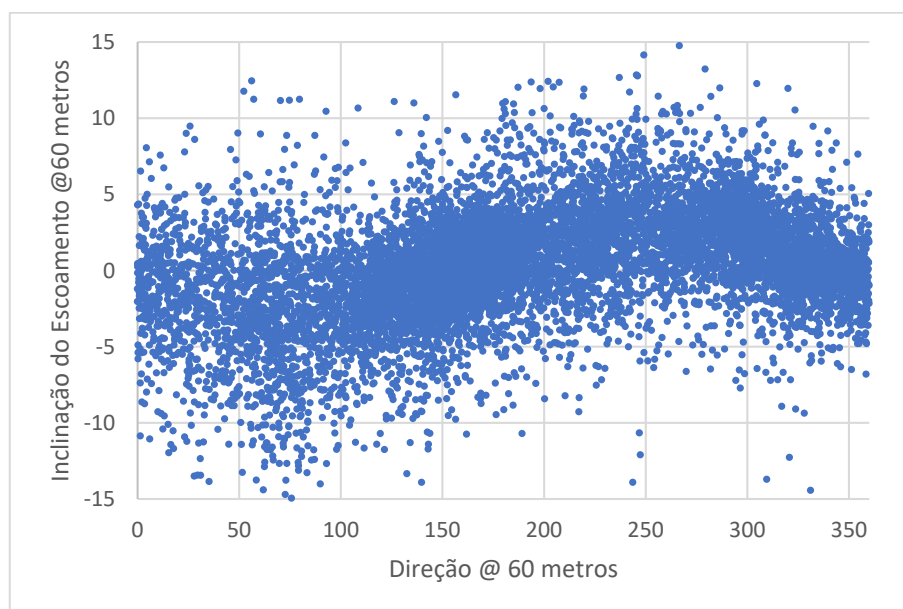
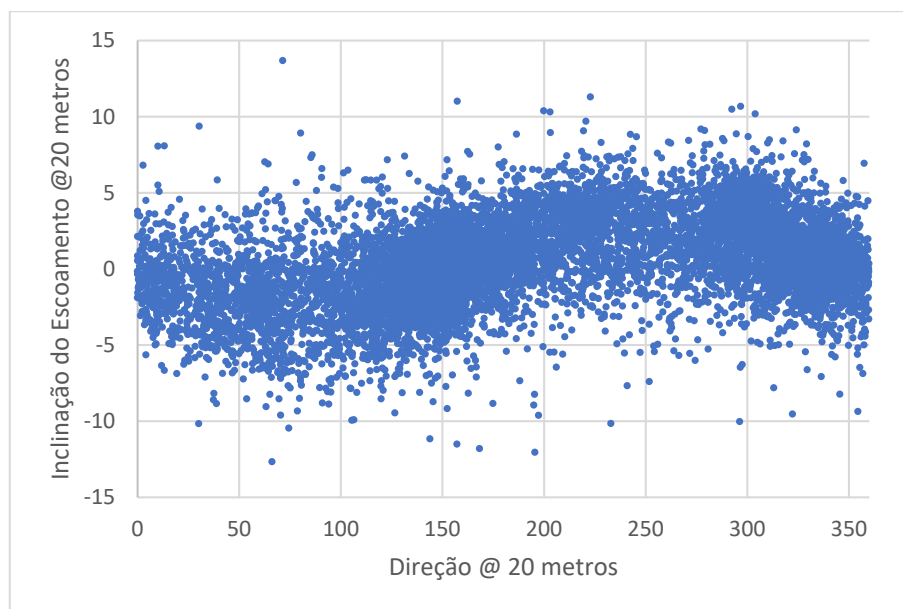
Sensibilidade do LiDAR a variáveis ambientais.

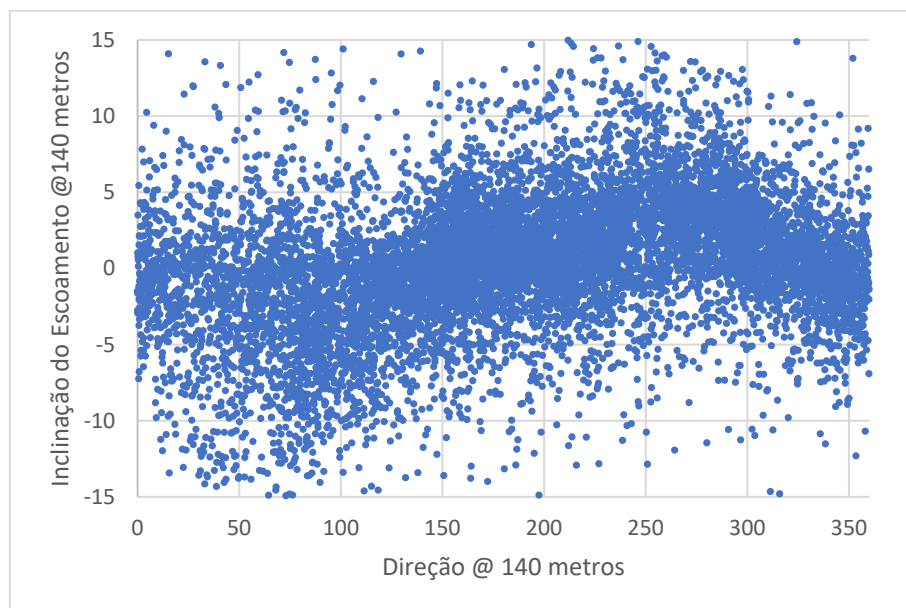
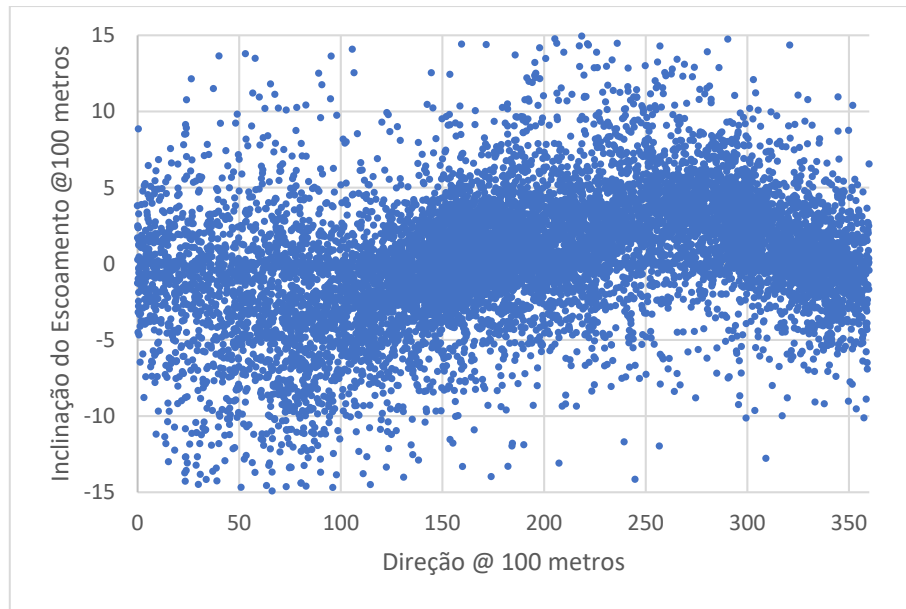
Altura a.n.s [m]	Variável independente	Média	Desvio Padrão	<i>m</i> da reta	Sensibilidade	R ²	Sensibilidade × R
40	Temperatura	21,1	5,44	-0,01	-0,04	3×10 ⁻⁶	-7×10 ⁻⁵
60		21,2	5,16	0,08	0,39	4×10 ⁻⁴	8×10 ⁻³
80		22,3	5,42	0,09	0,51	4×10 ⁻⁴	0,01
100		21,8	5,4	0,12	0,64	6×10 ⁻⁴	0,02
40	Gradiente de Temperatura	0,01	0,01	-35,62	-0,44	4×10 ⁻⁴	-0,01
60		0,01	0,01	-92,36	-1,14	3×10 ⁻³	-0,06
80		0,01	0,01	-102,49	-1,27	3×10 ⁻³	-0,06
100		0,01	0,01	-128,44	-1,59	4×10 ⁻³	-0,10
40	Rotação em Altura	0,10	0,94	-0,33	-0,31	2×10 ⁻⁴	-4×10 ⁻³
60		0,10	0,94	0,61	0,57	7×10 ⁻⁴	0,02
80		0,10	0,94	1,44	1,36	3×10 ⁻³	0,07
100		0,10	0,94	1,40	1,32	2,5×10 ⁻³	0,07
40		55,2	19,7	0,01	0,18	7×10 ⁻⁵	2×10 ⁻³

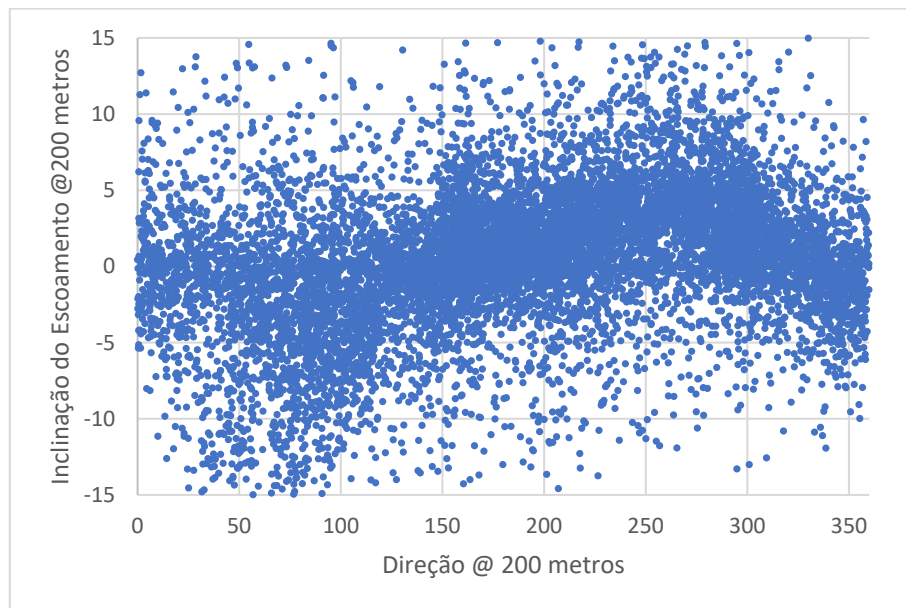
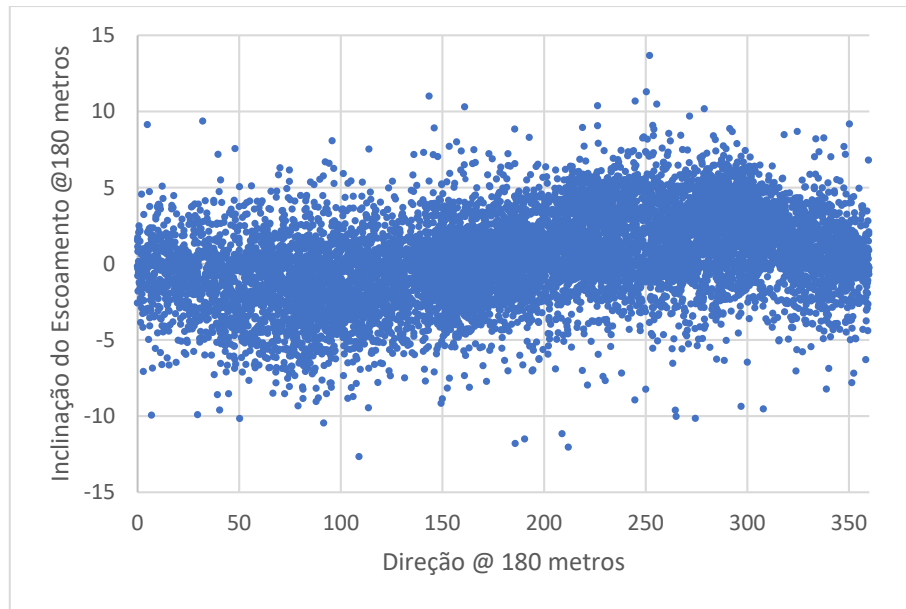
60	Humidade Relativa	55,2	19,7	-0,05	-1,05	2×10^{-3}	-0,05
80		55,2	19,67	-0,07	-1,36	3×10^{-3}	-0,07
100		55,2	19,7	0,09	1,81	5×10^{-3}	0,12
40	<i>Shear Factor</i>	0,20	0,24	4,58	1,11	3×10^{-3}	0,06
60		0,20	0,24	1,82	0,44	4×10^{-4}	0,01
80		0,20	0,24	-1,2	-0,29	1×10^{-4}	-3×10^{-3}
100		0,20	0,24	-5,23	-1,27	2×10^{-3}	-0,06
40	Intensidade de Turbulência	0,30	0,38	6,88	2,64	0,01	0,32
60		0,27	0,30	13,6	4,08	0,04	0,79
80		0,26	0,32	17,96	5,71	0,05	1,30
100		0,26	0,33	19,35	6,30	0,06	1,50

ANEXO C: Inclinação do escoamento em função da direção a todas as alturas

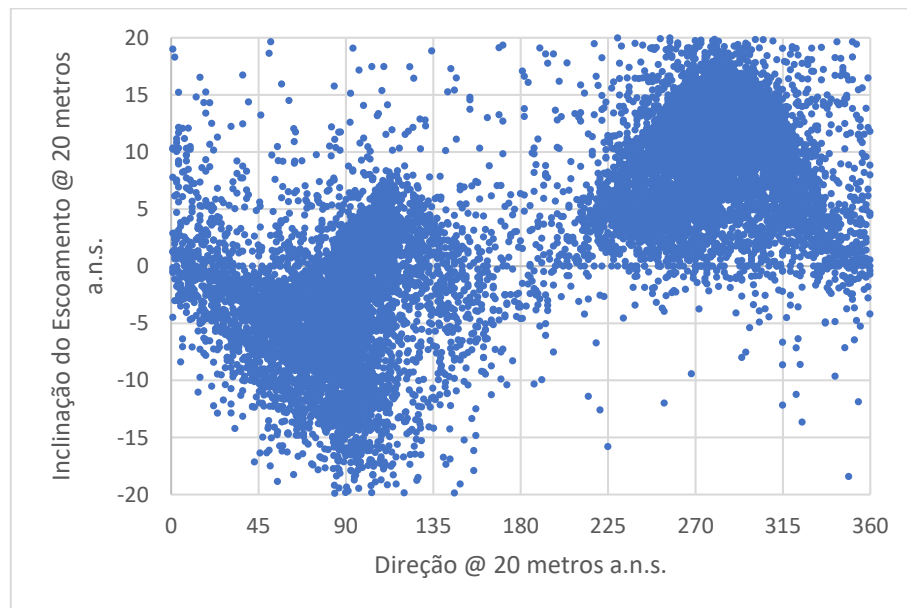
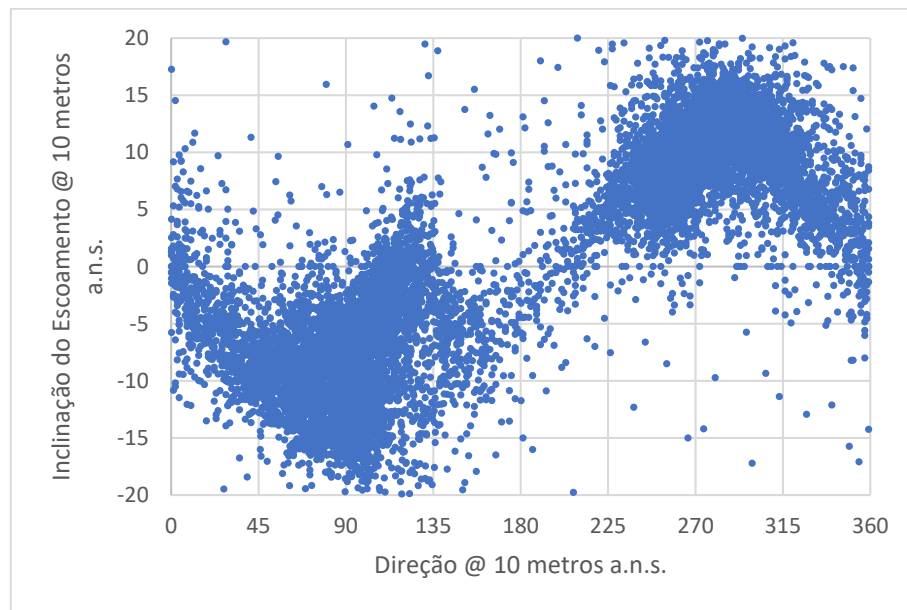
LiDAR Zephir® 112

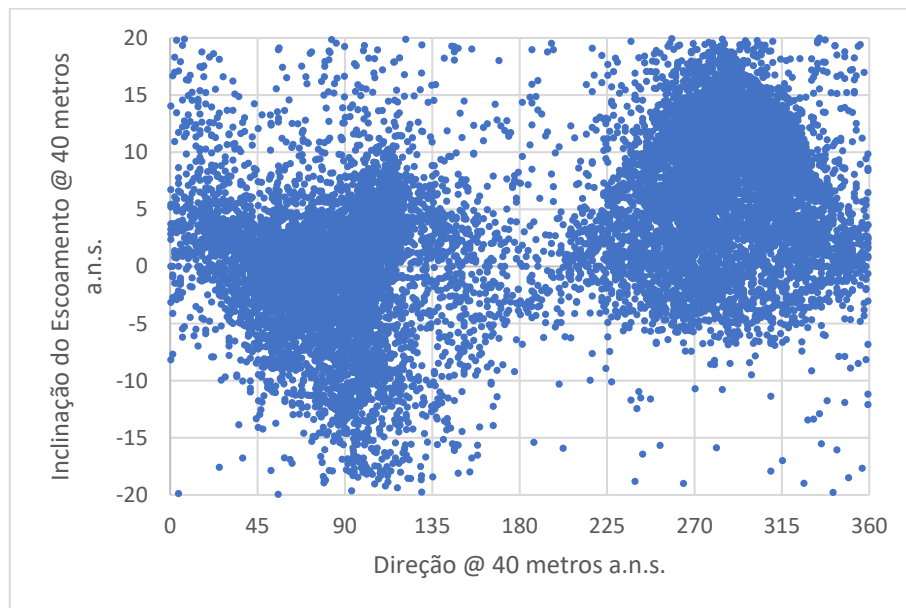
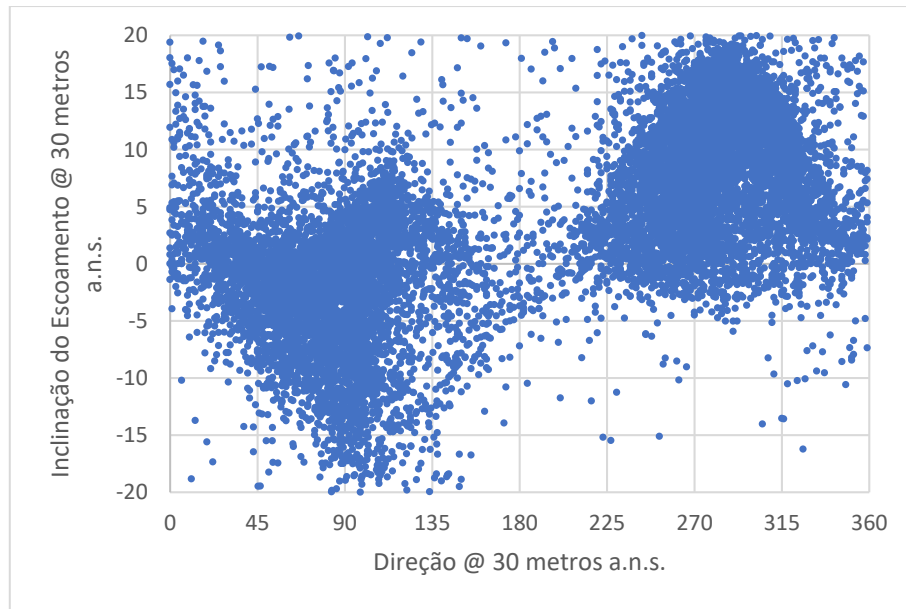


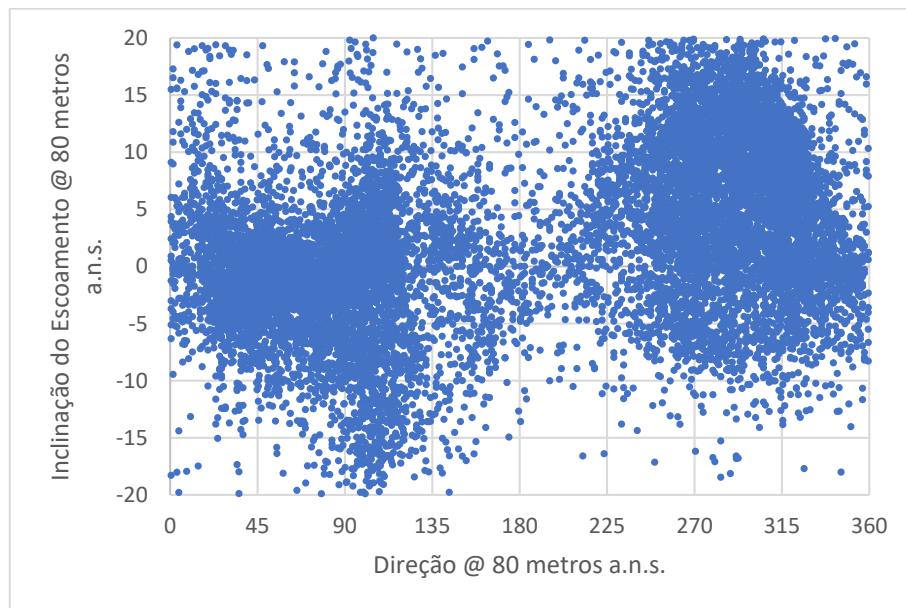
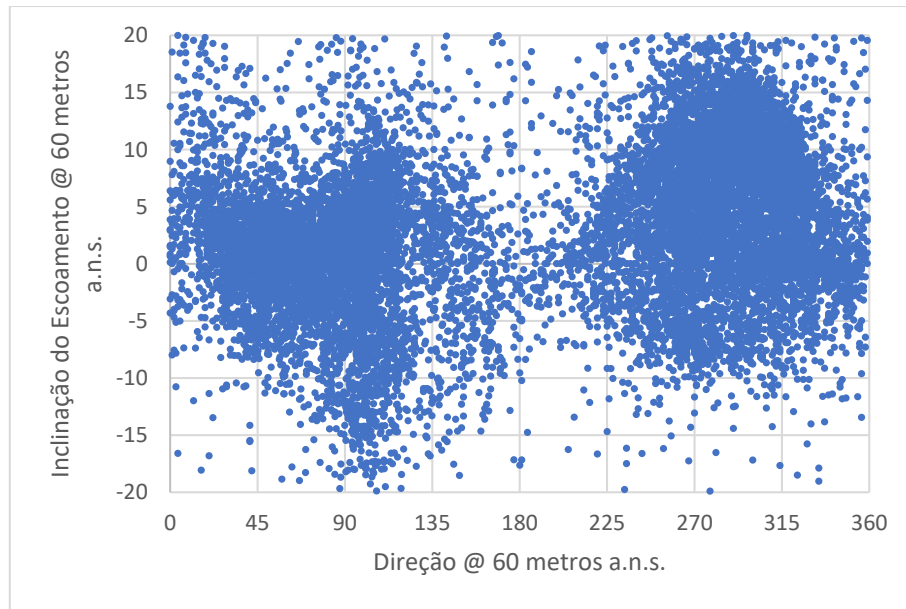


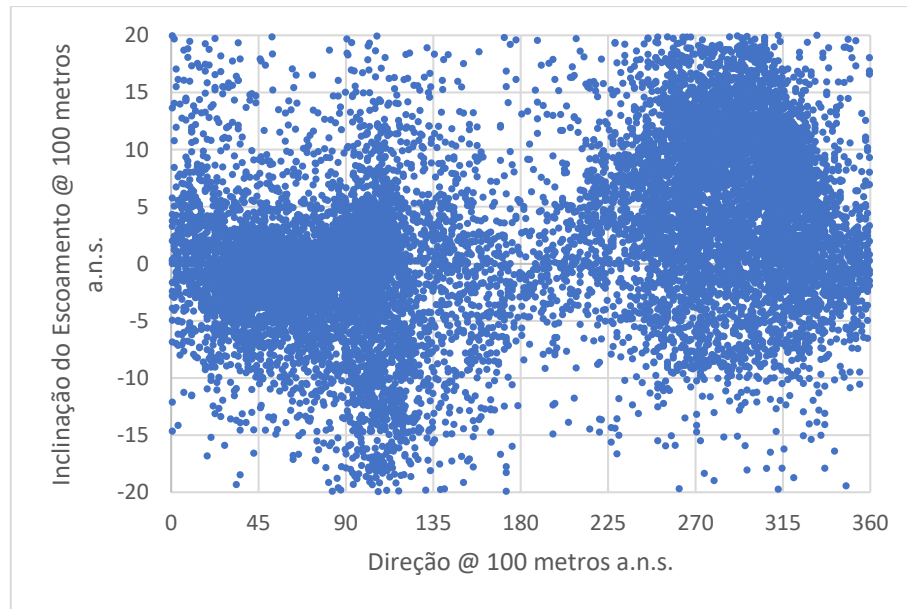


Estação de Medição n.º 20

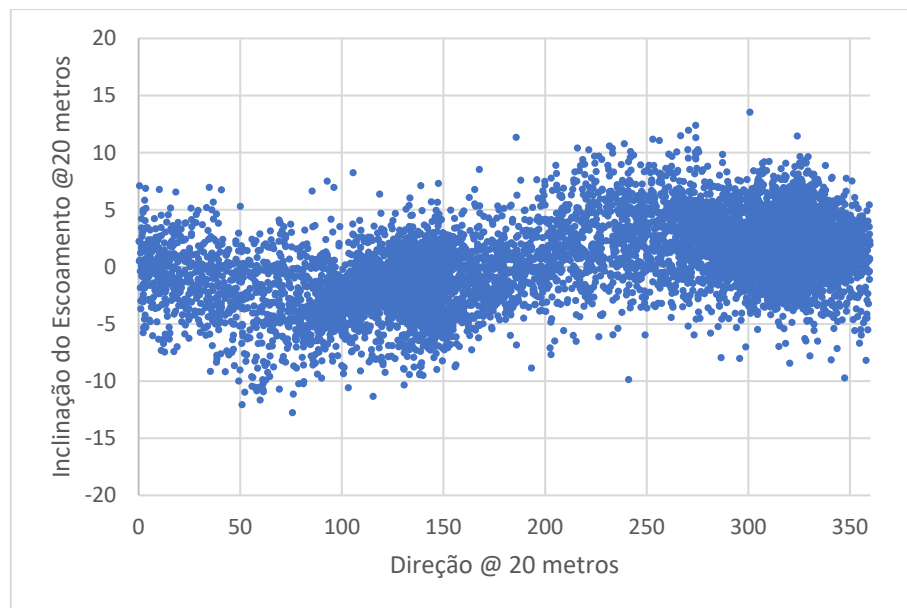


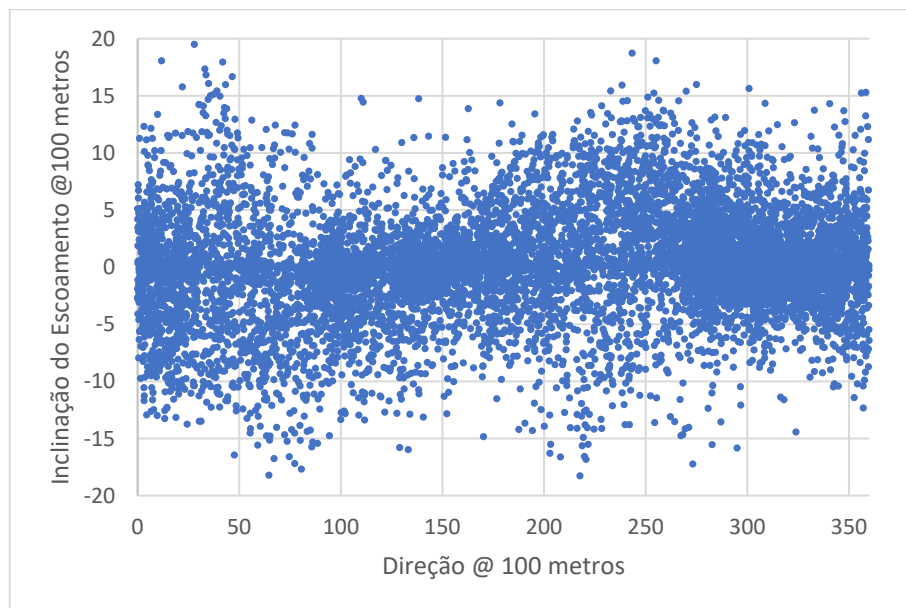
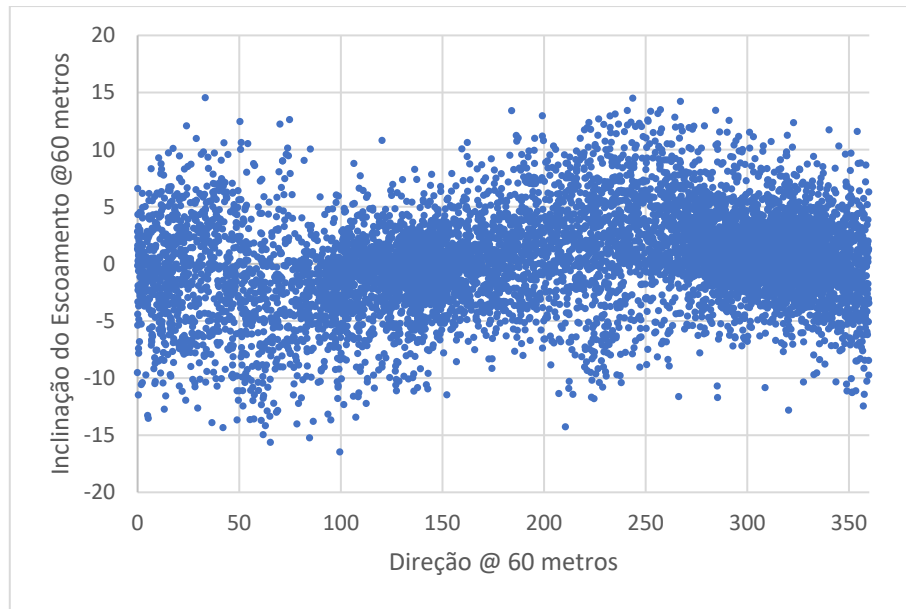


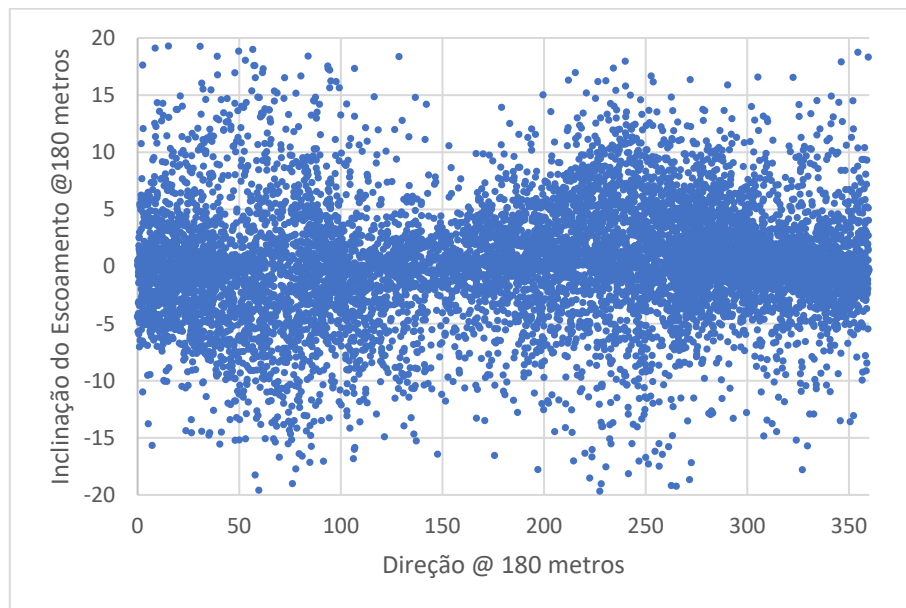
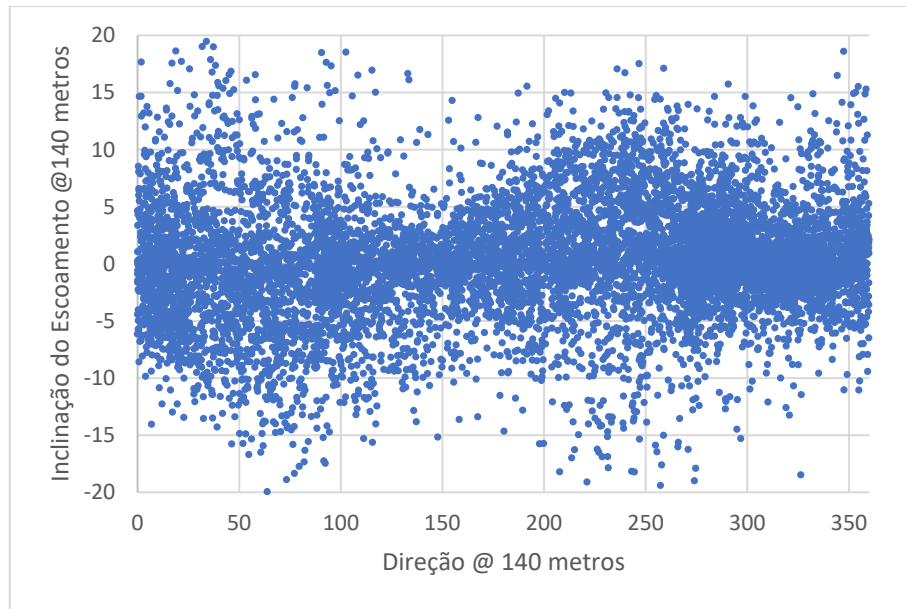


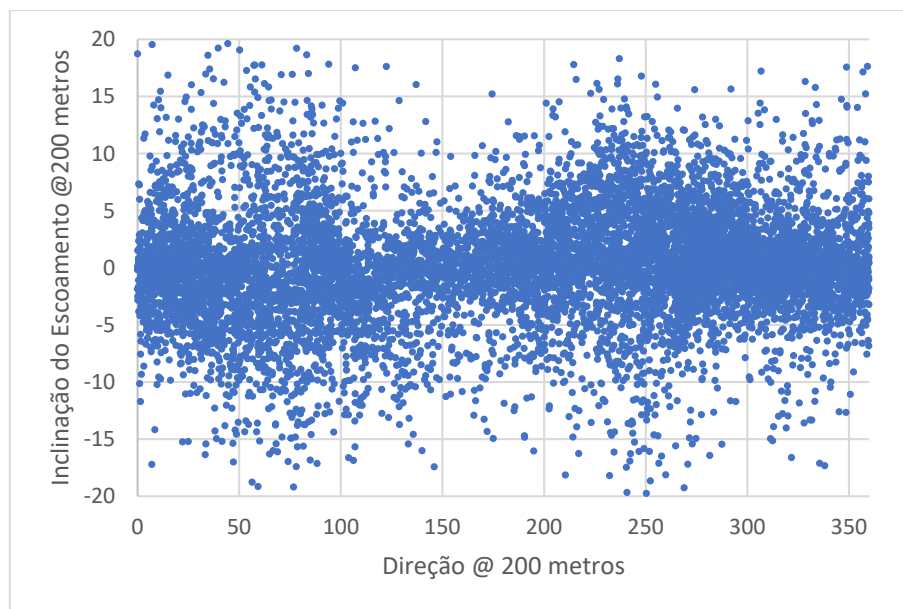


LiDAR Zephir® 111

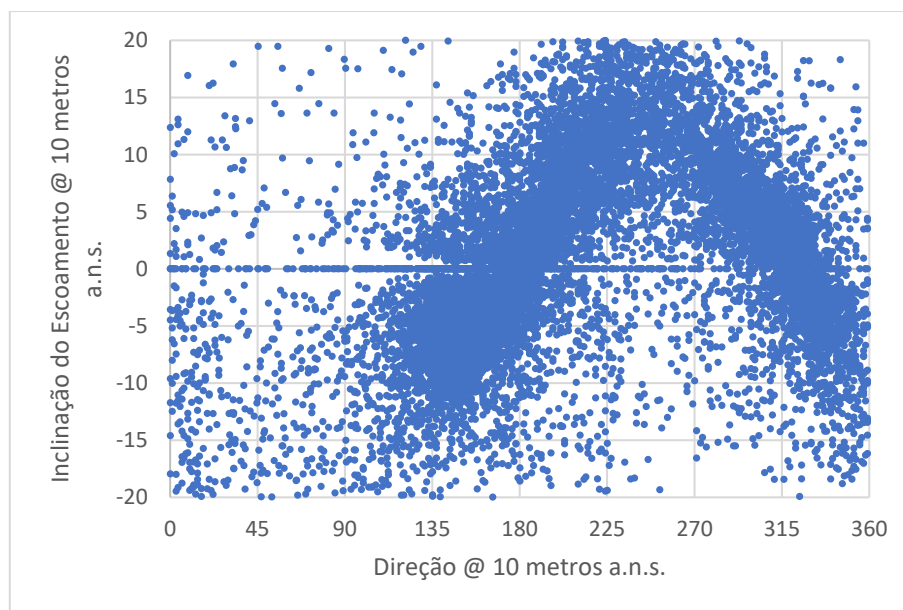


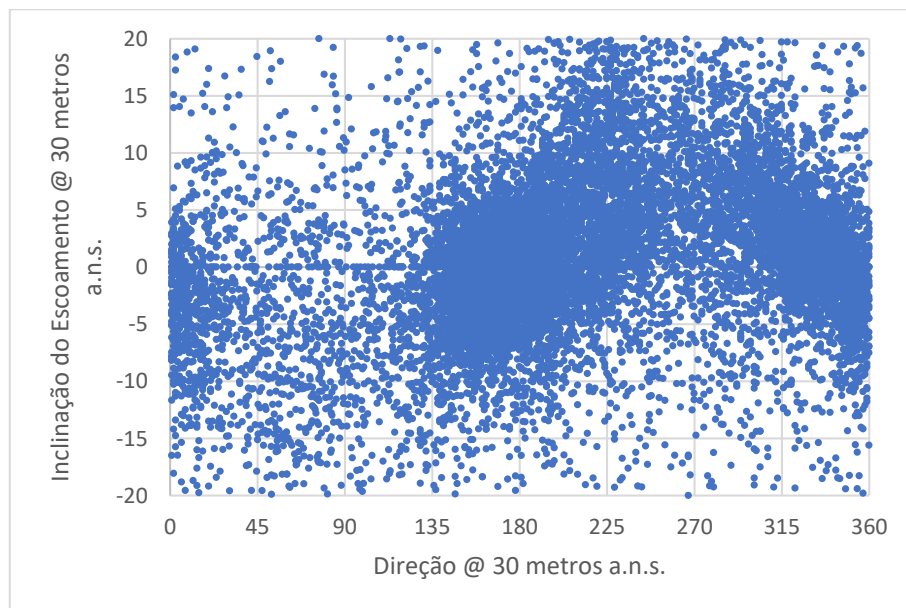
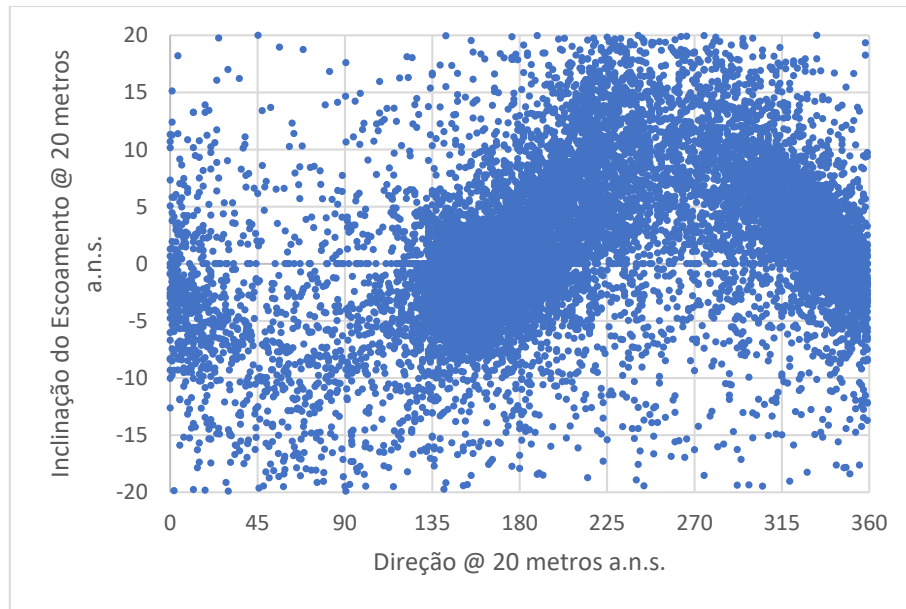


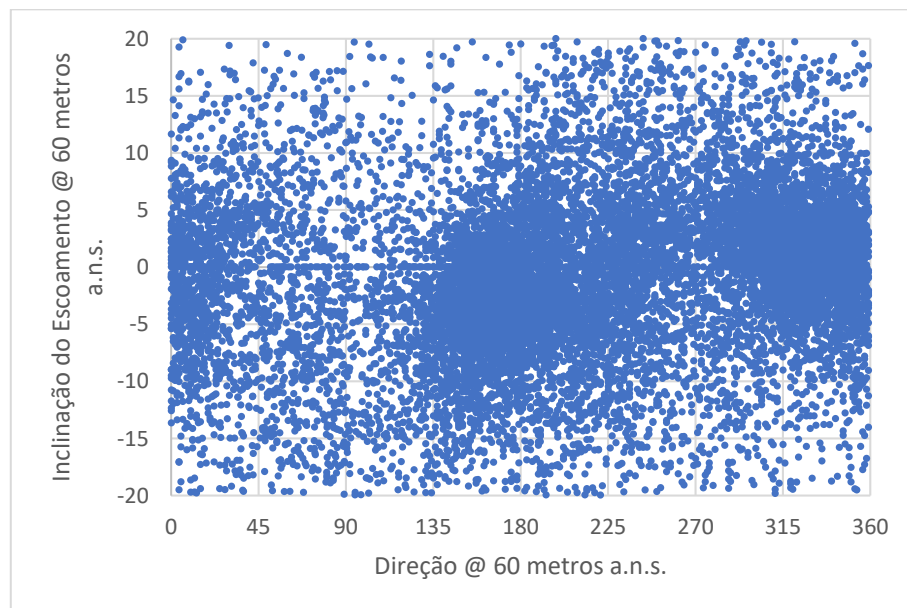
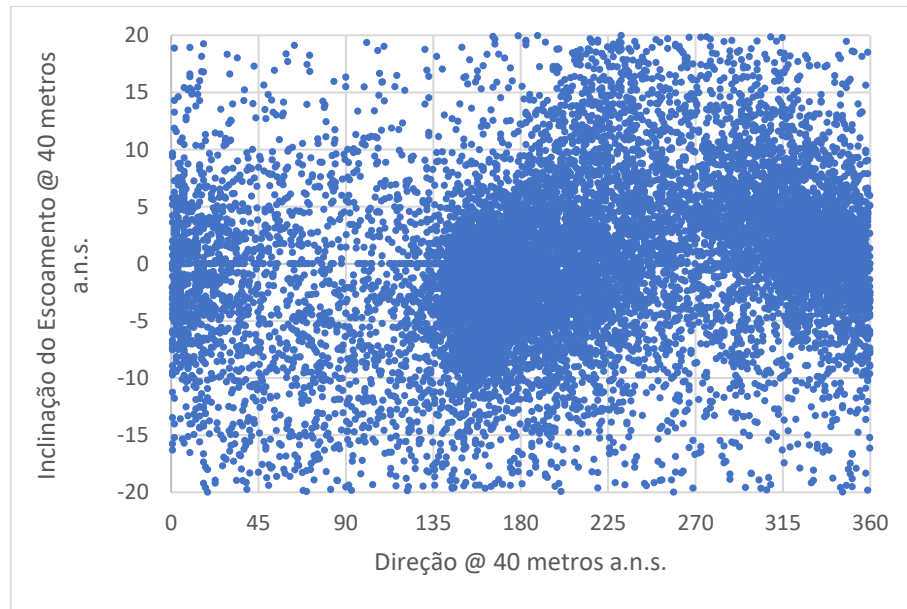


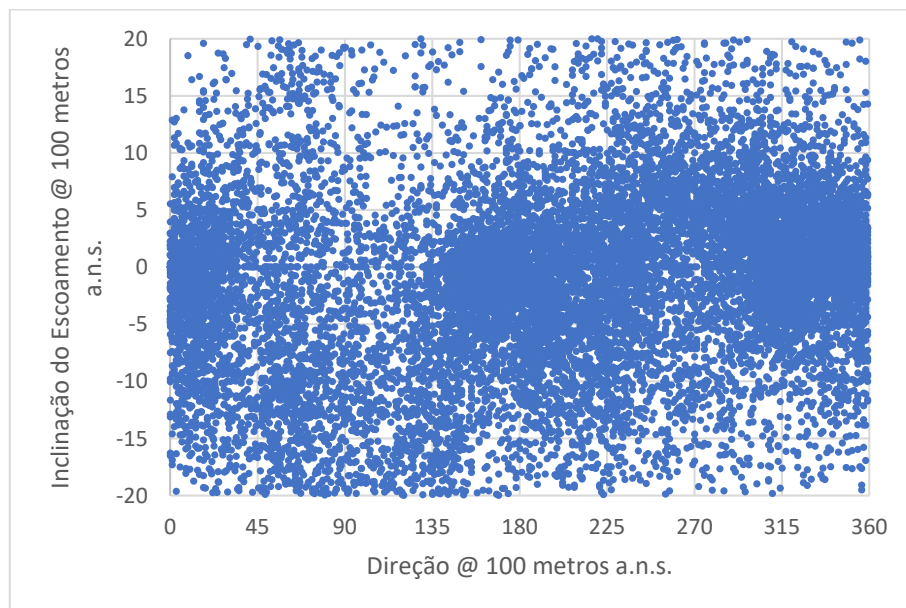
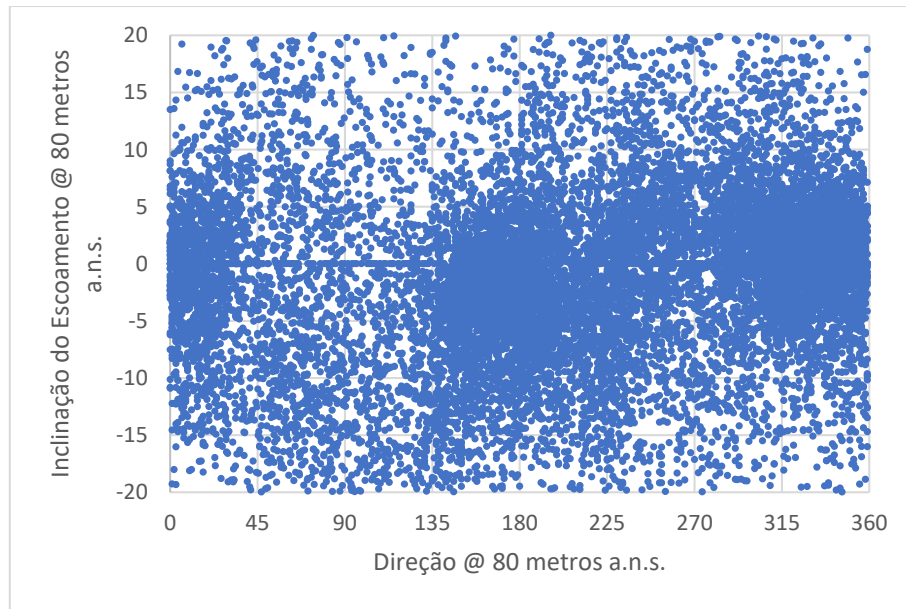


Estação de Medição n.º 25

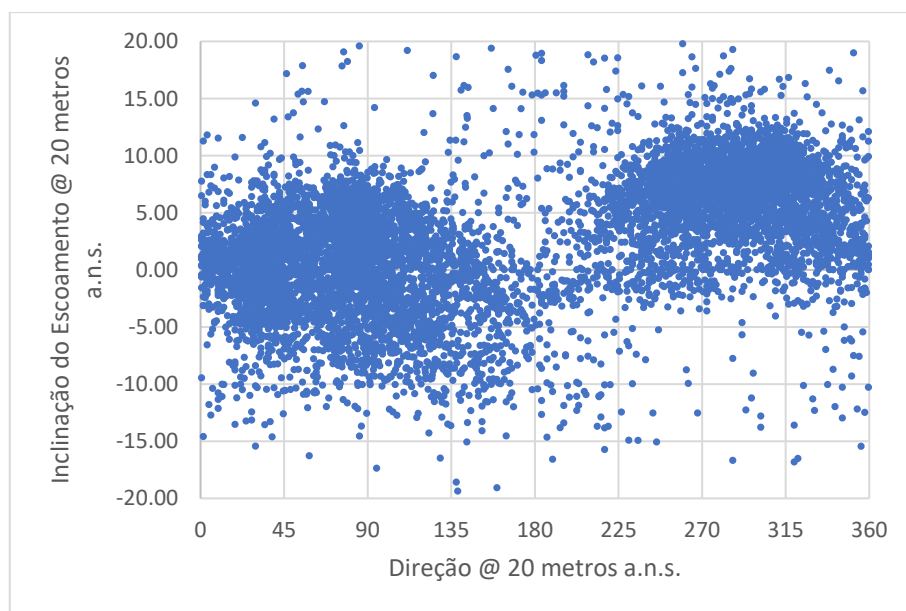
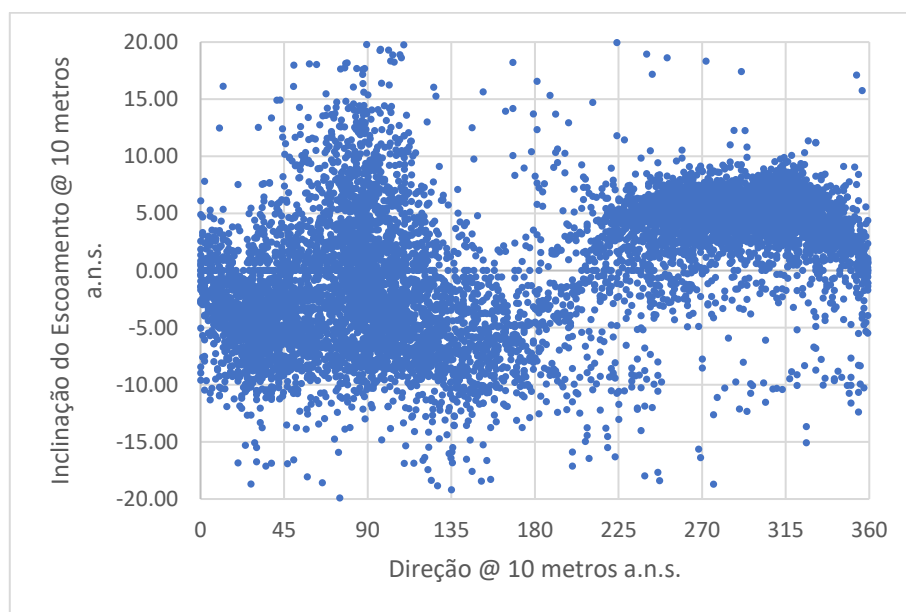


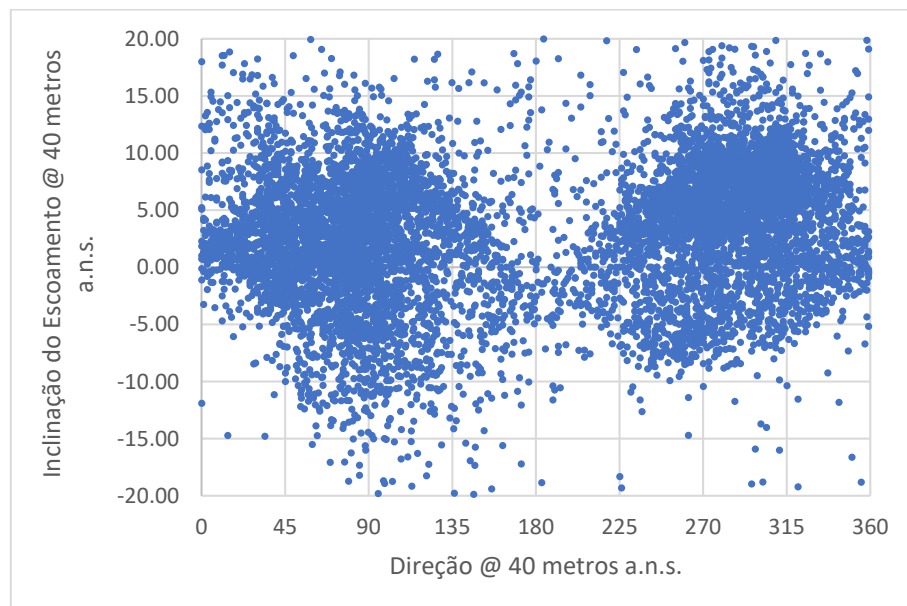
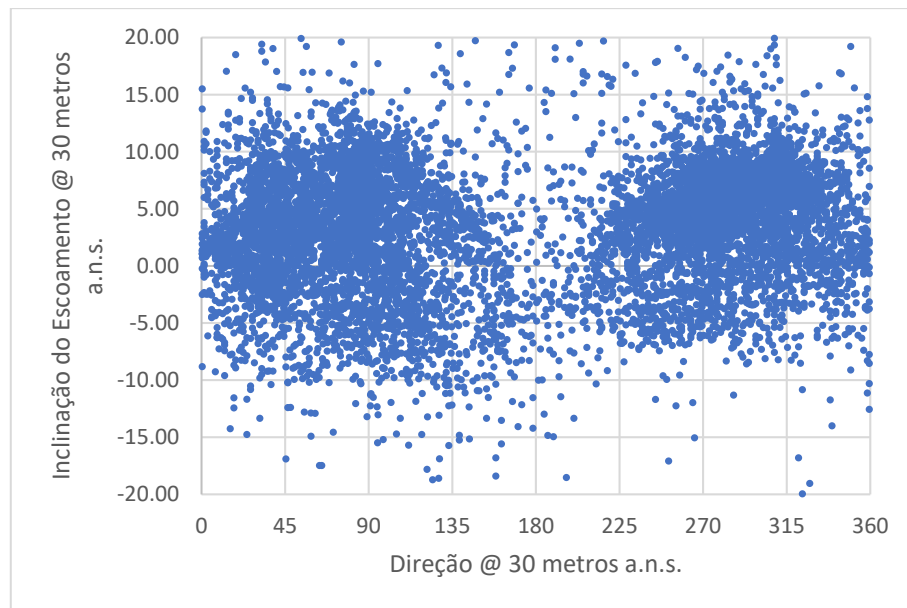


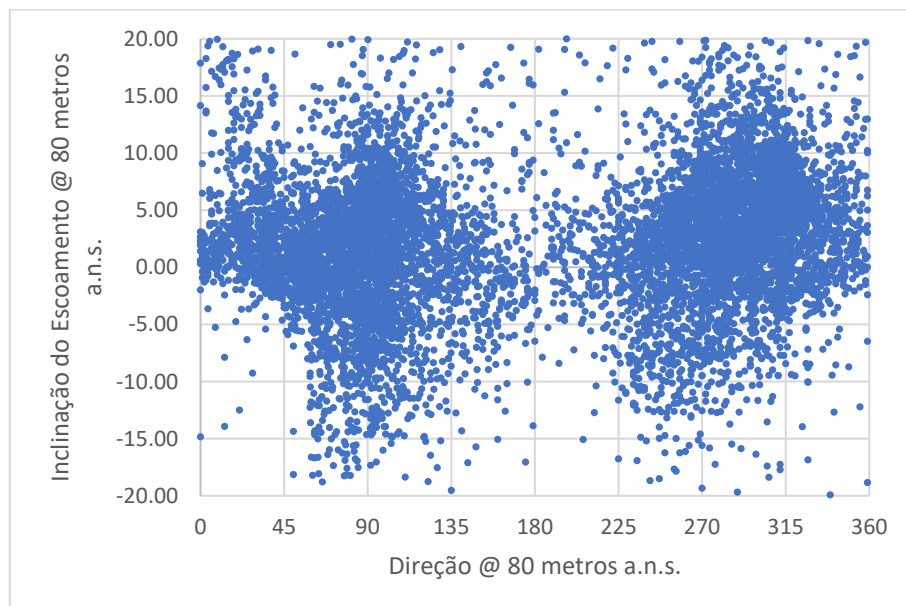
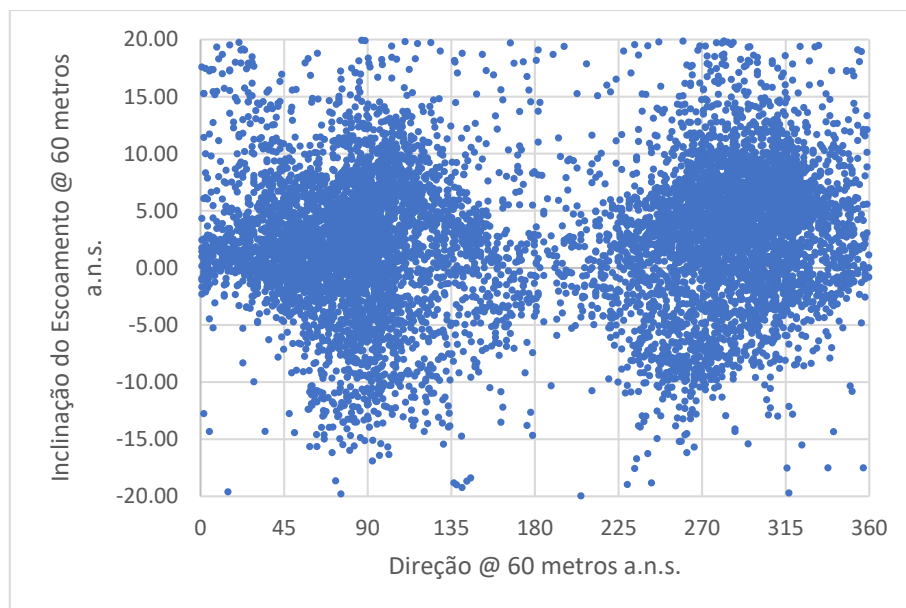


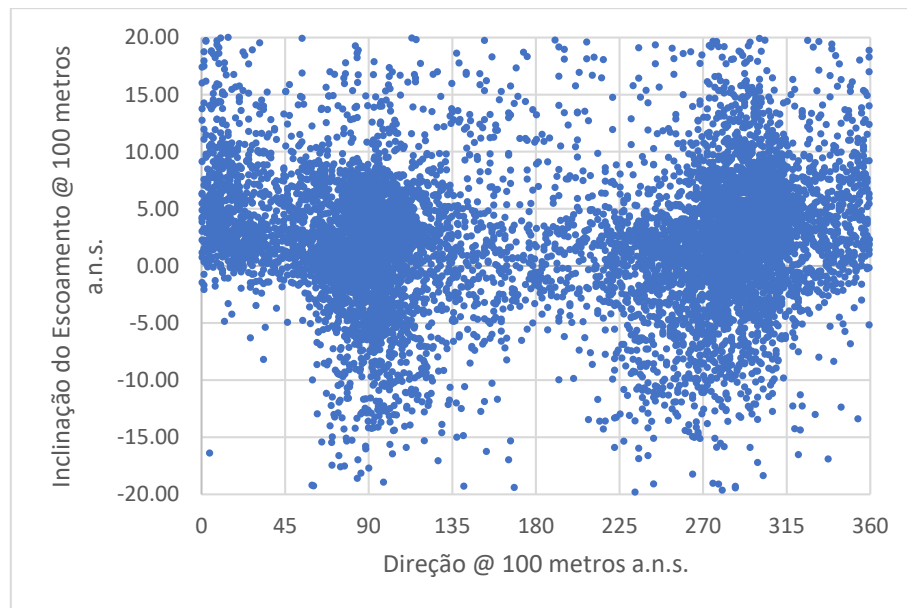


Estação de Medição n.º 29

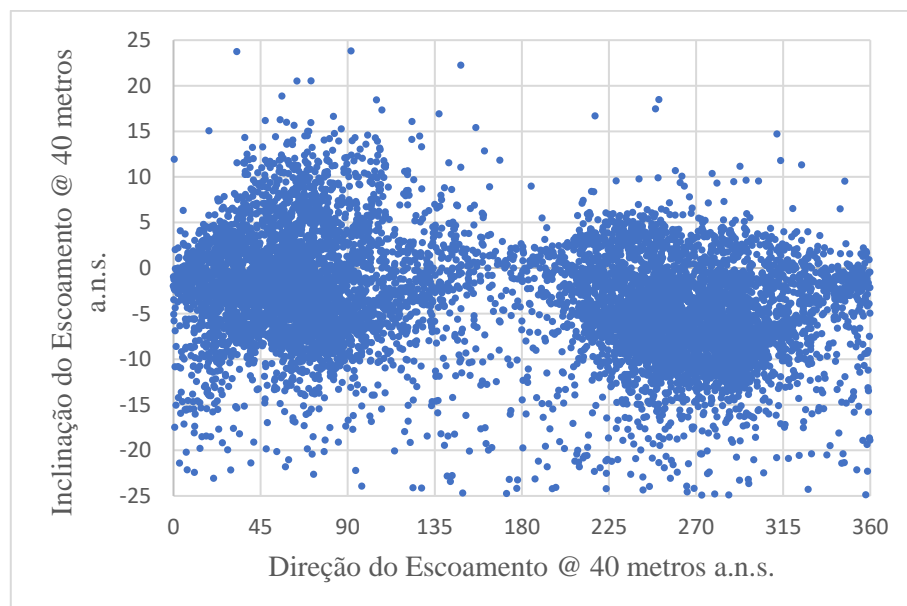


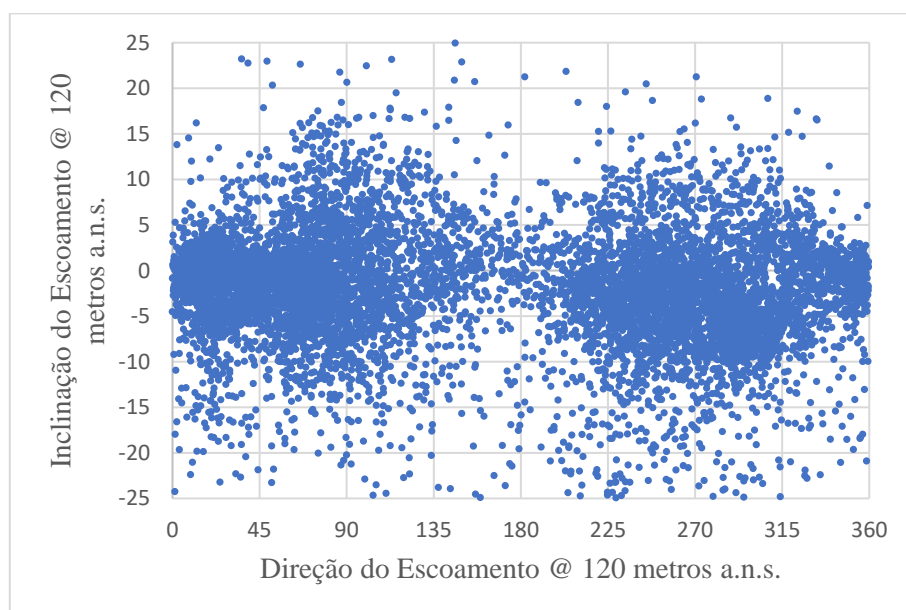
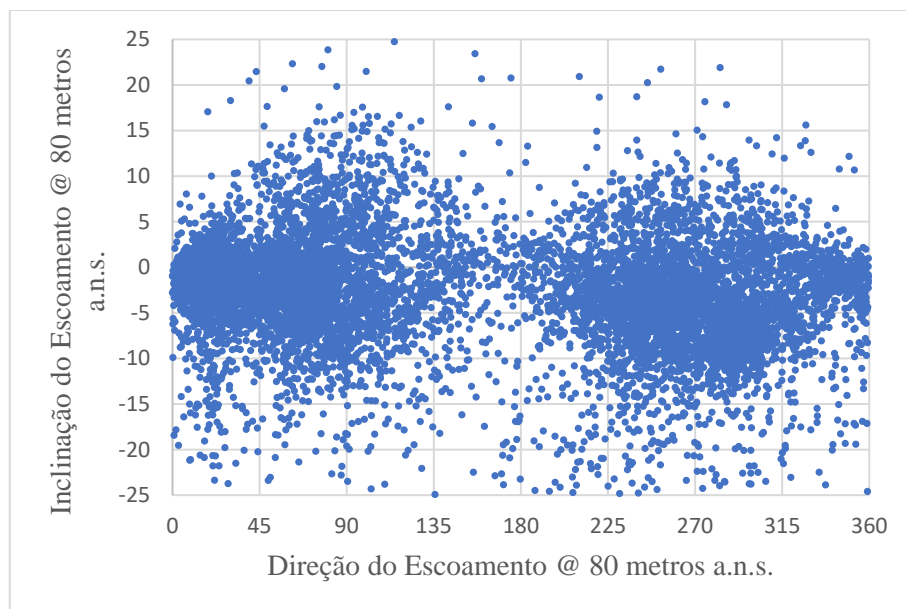


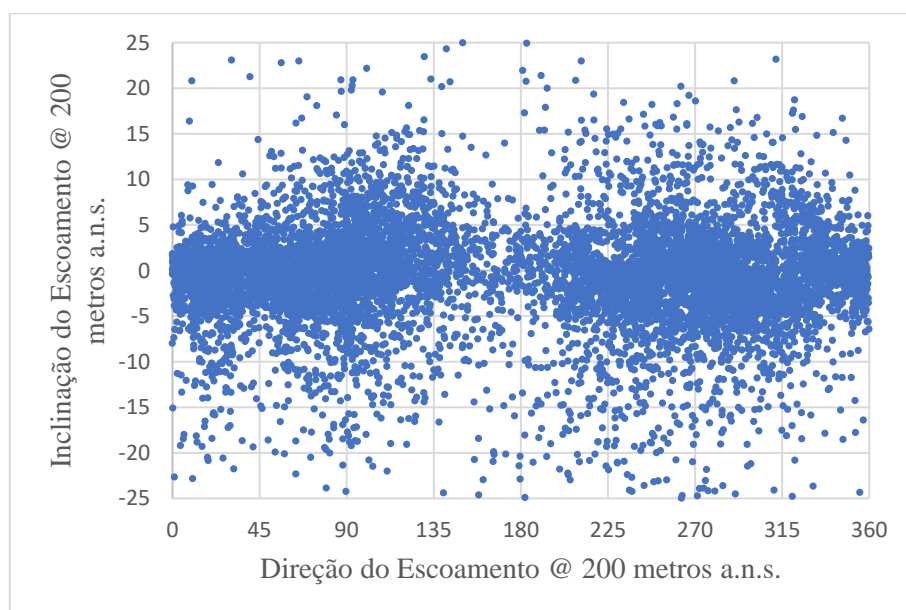
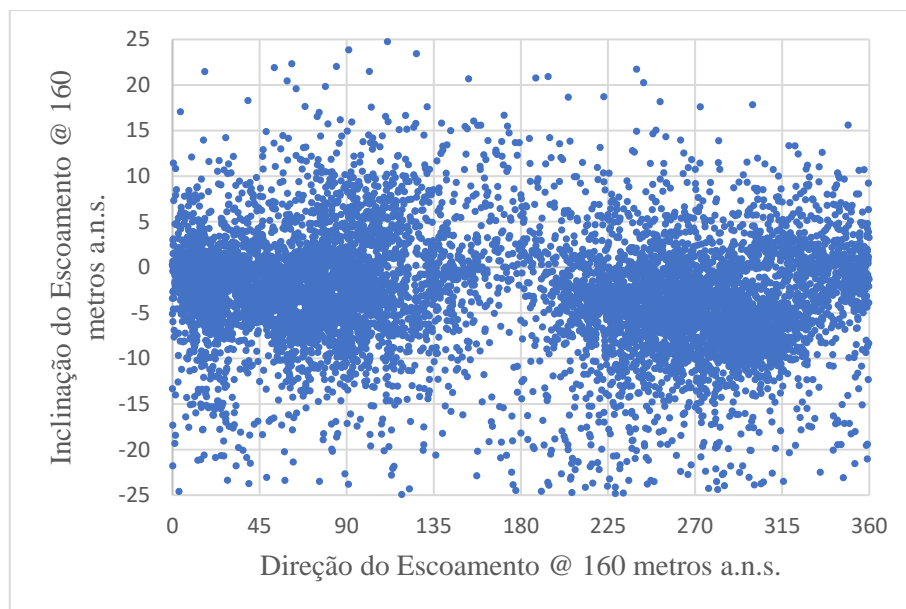




LiDAR Windcube®

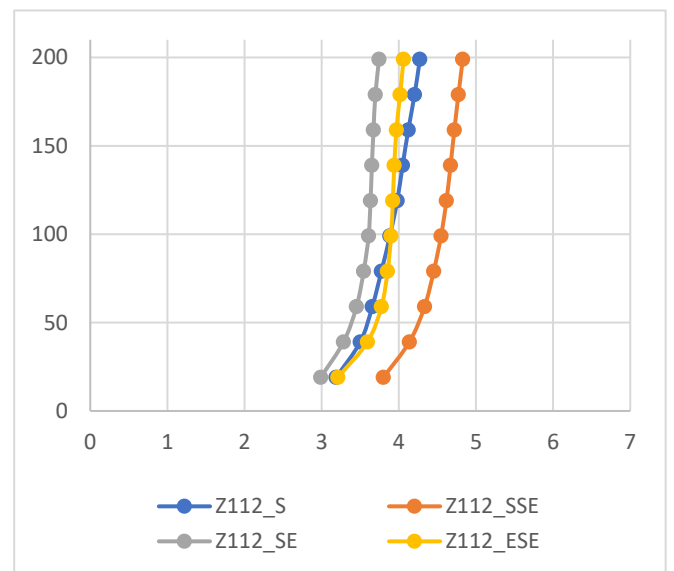
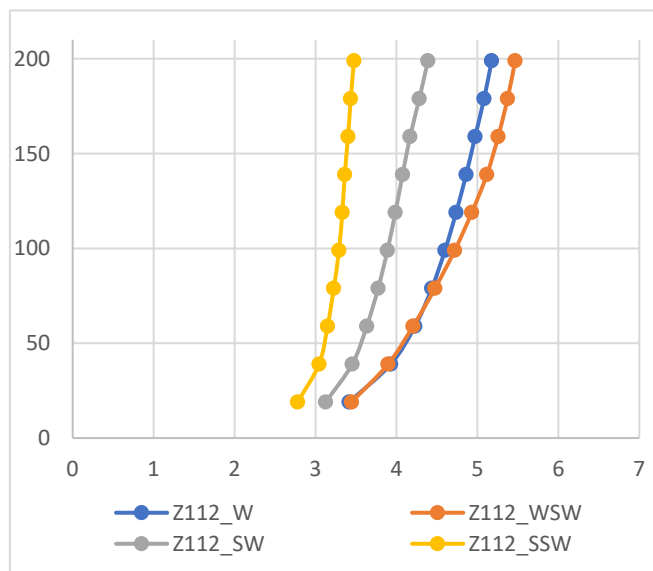
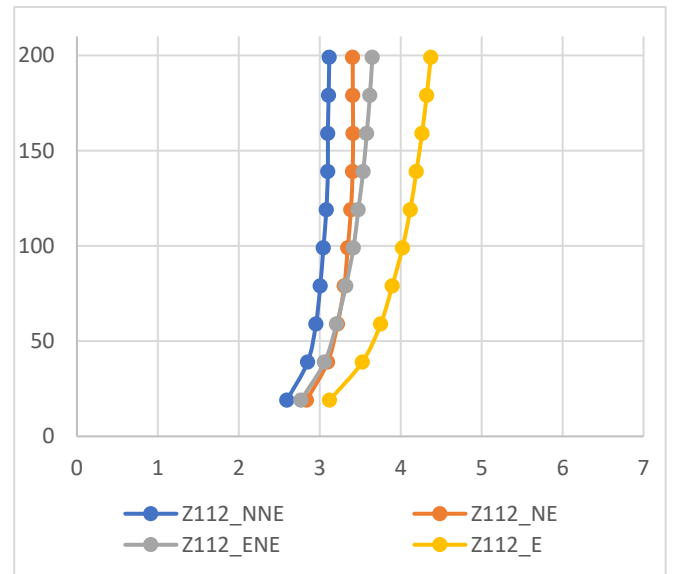
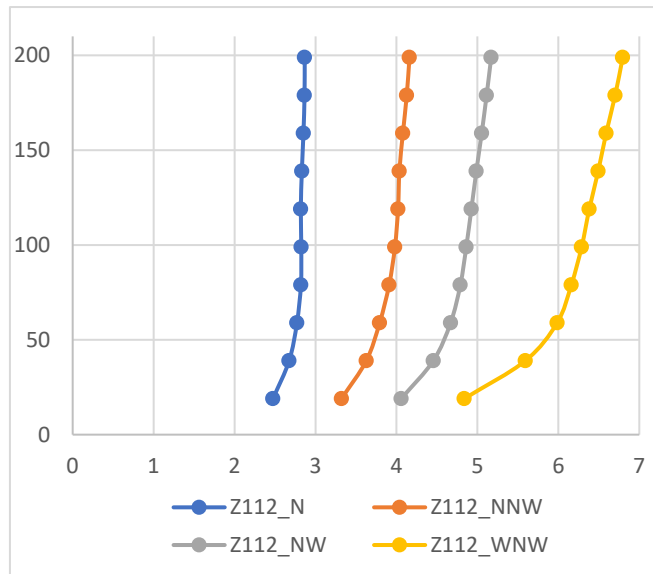




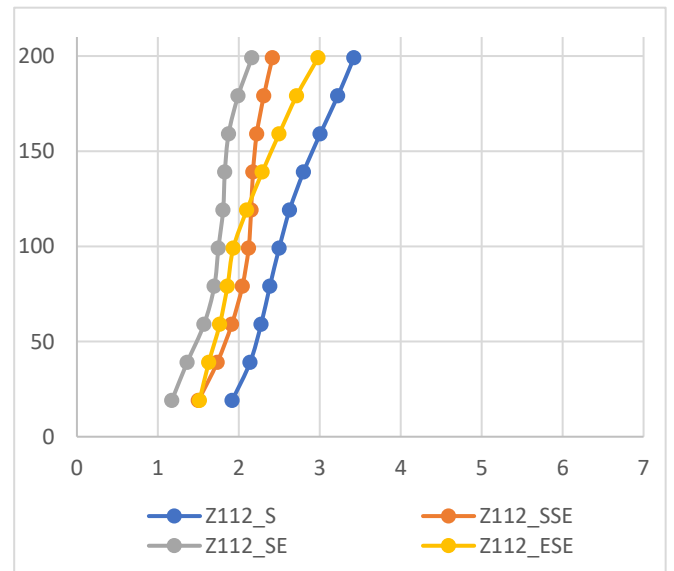
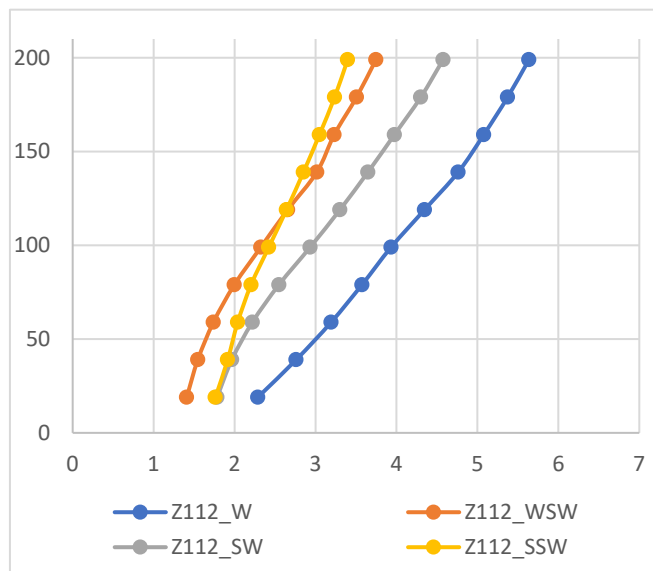
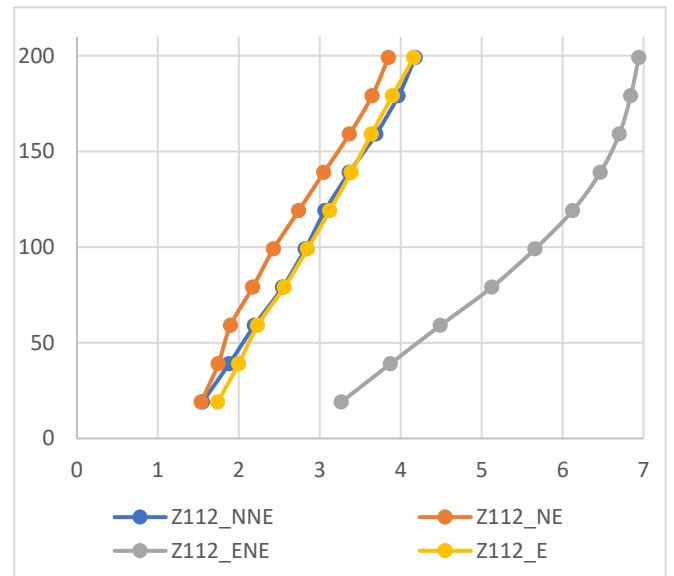
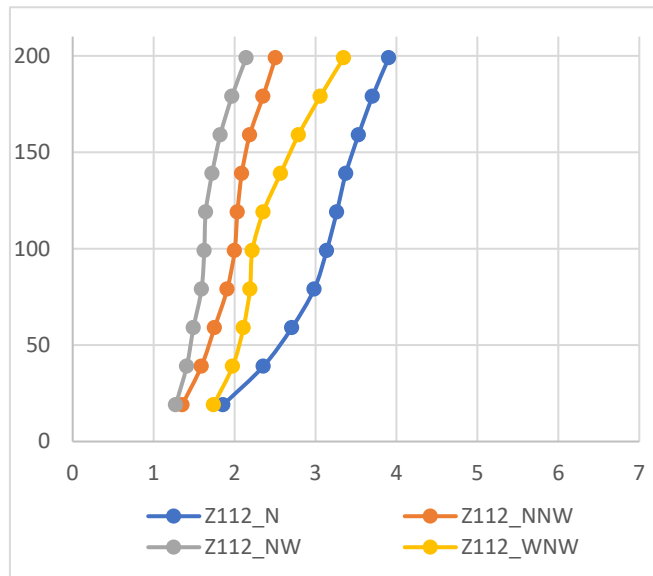


ANEXO D: Perfis de Velocidade médio diurnos e noturnos

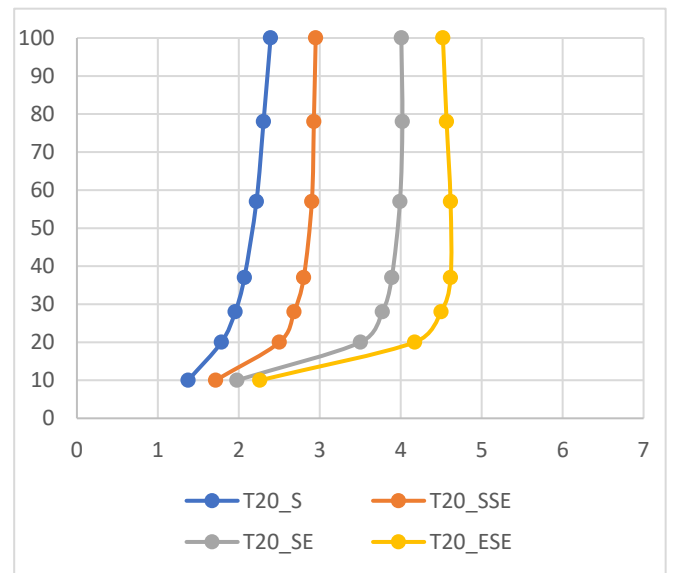
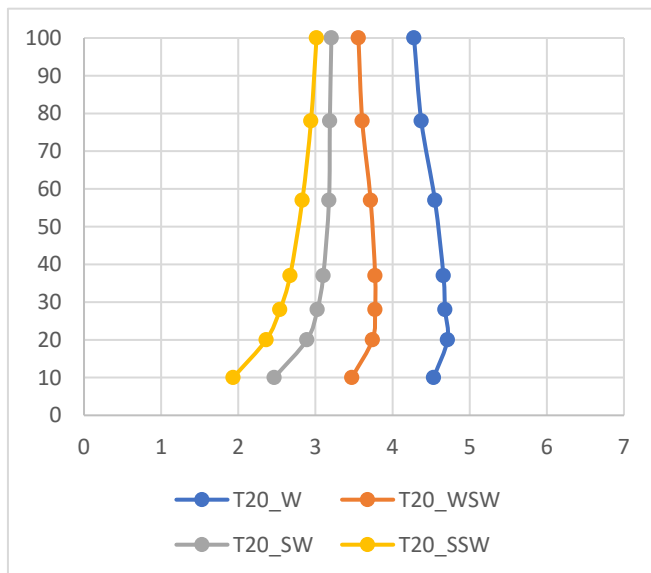
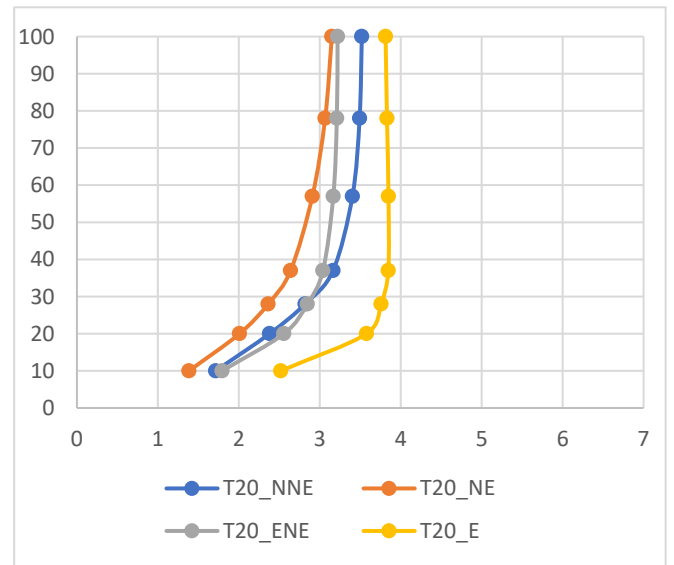
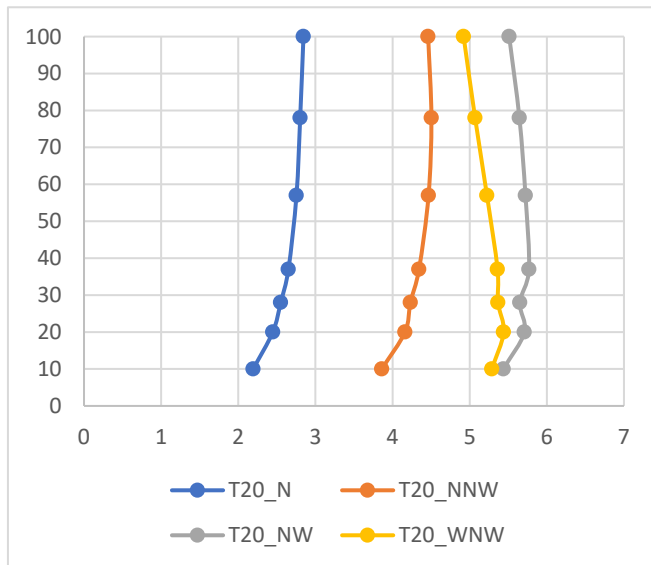
Zephir 112 – Período Diurno



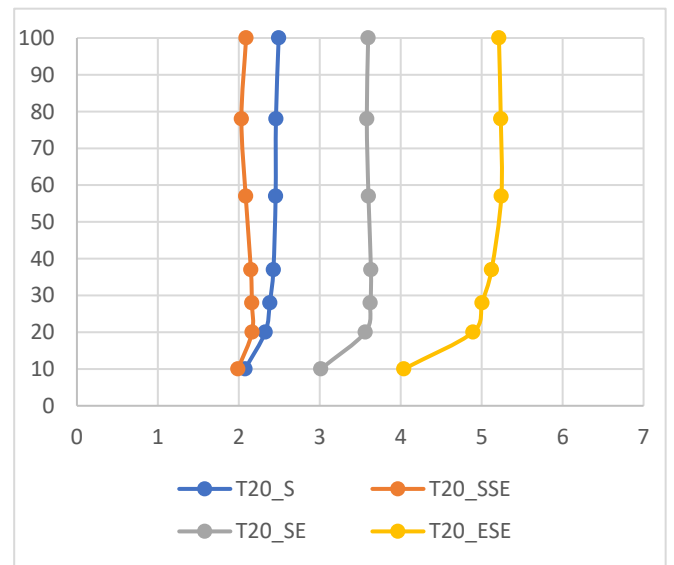
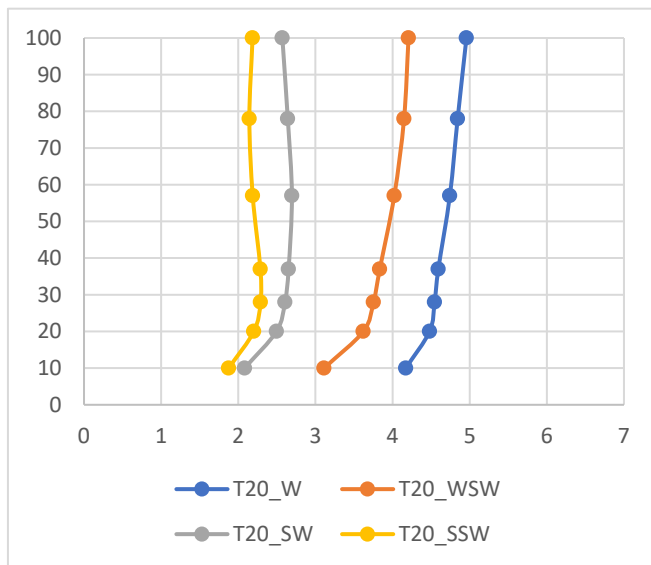
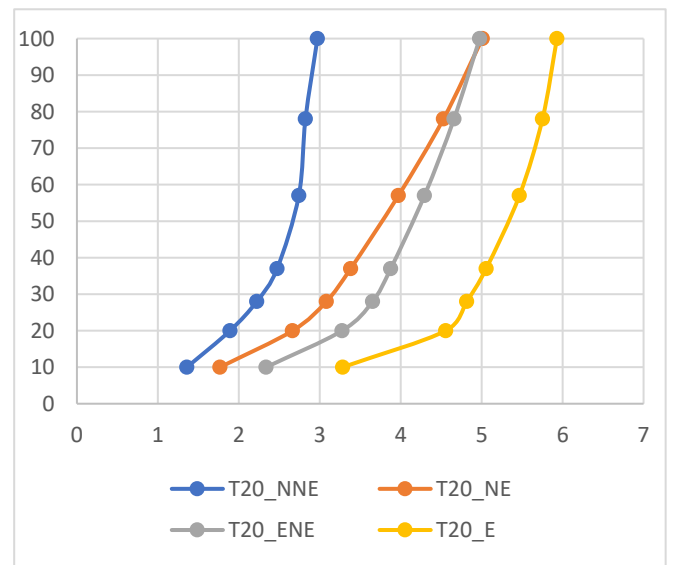
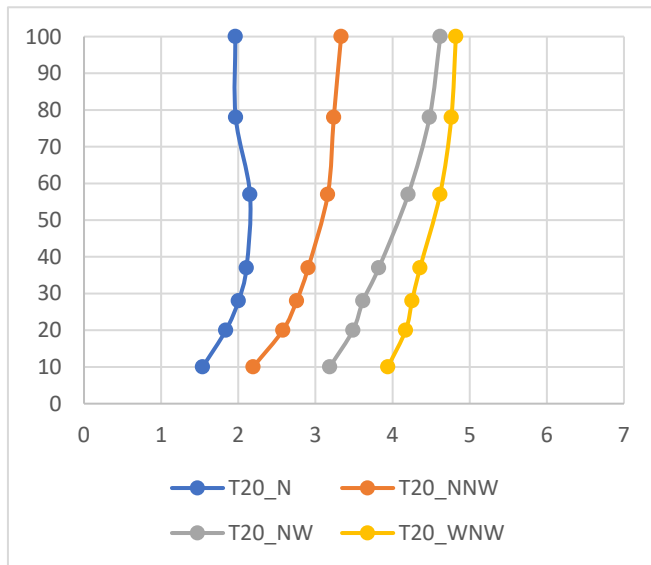
Zephir 112 – Período Noturno



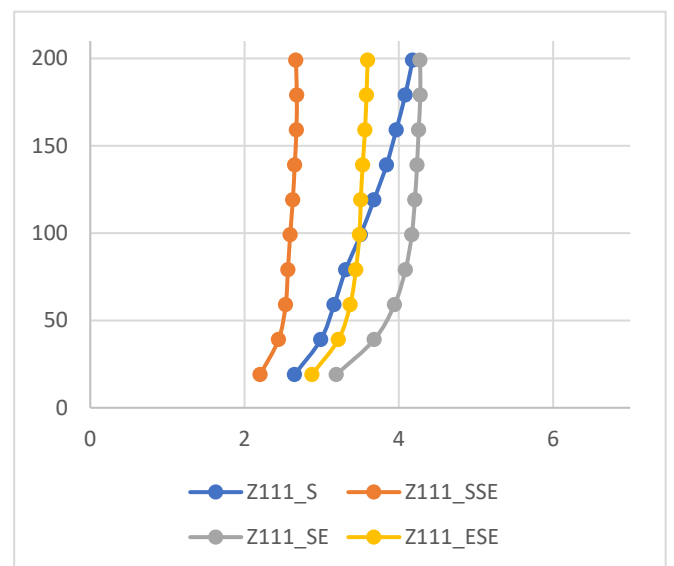
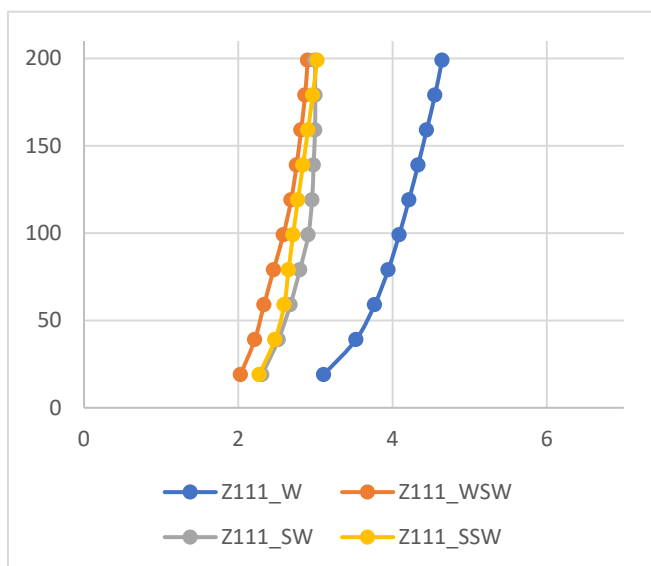
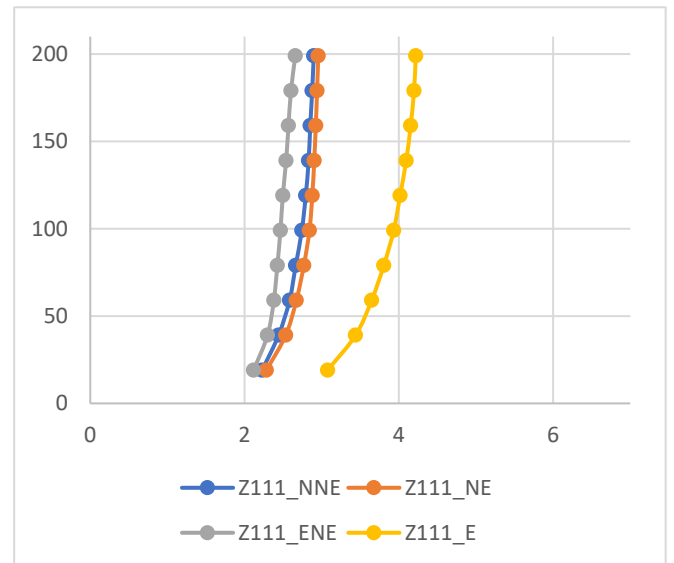
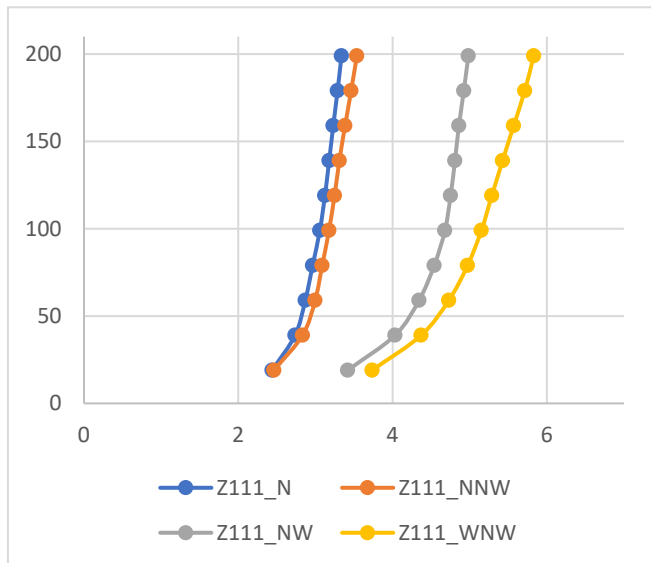
Estação de Medição n.º 20 – Período Diurno



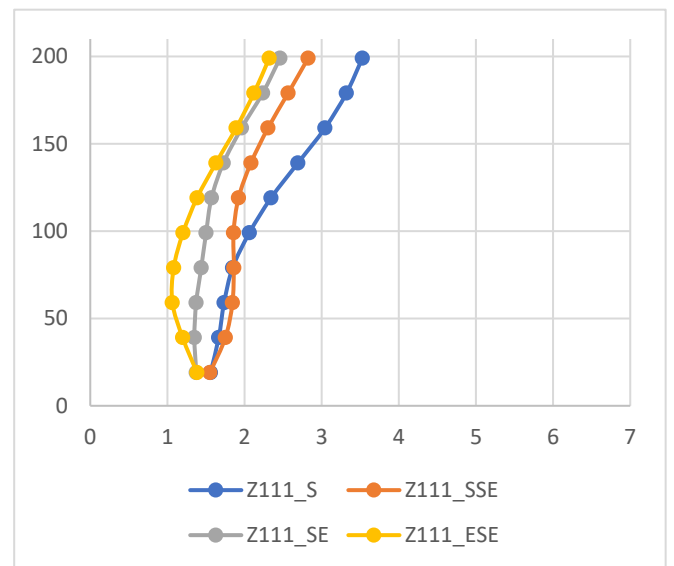
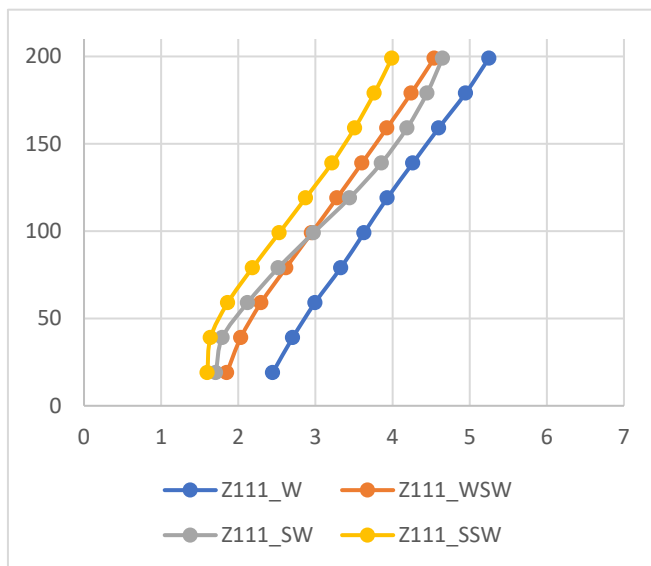
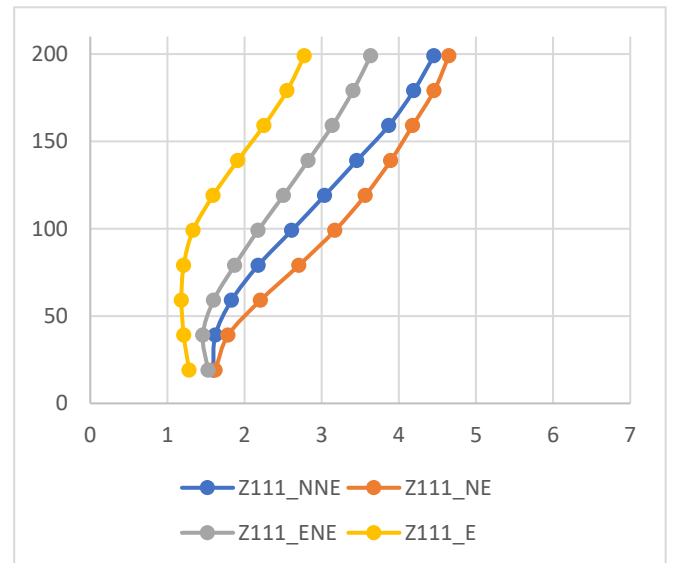
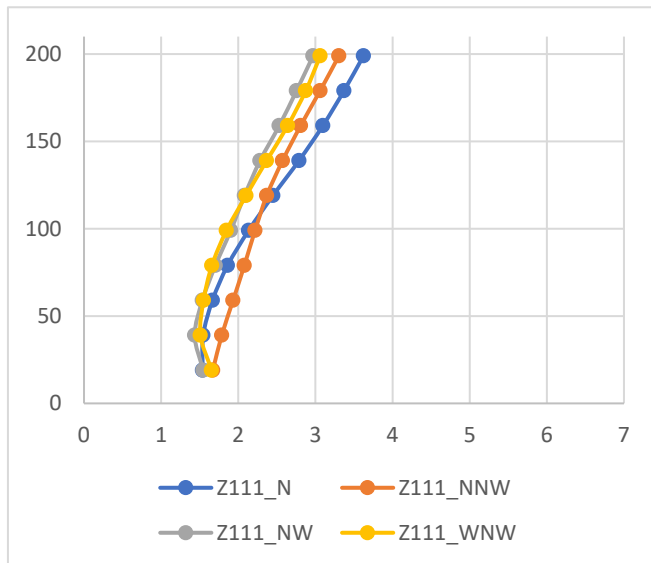
Estação de Medição n.º 20 – Período Noturno



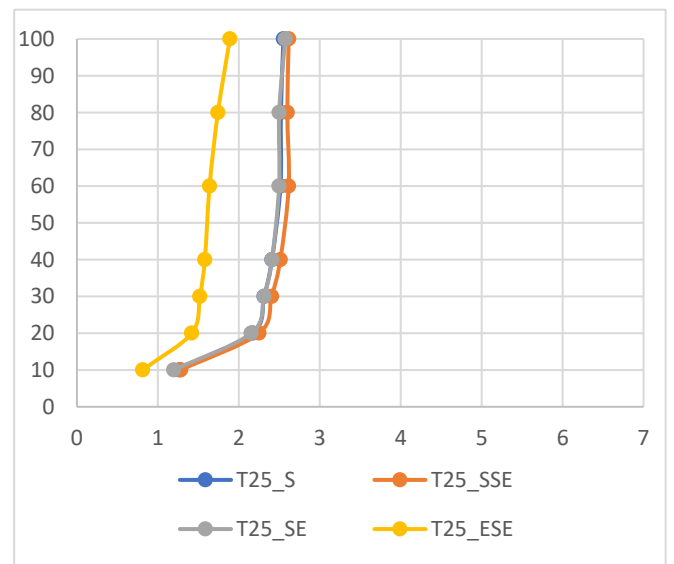
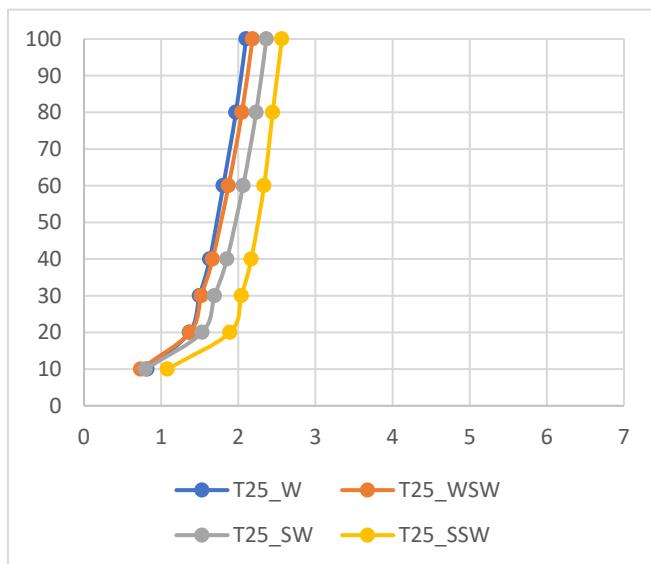
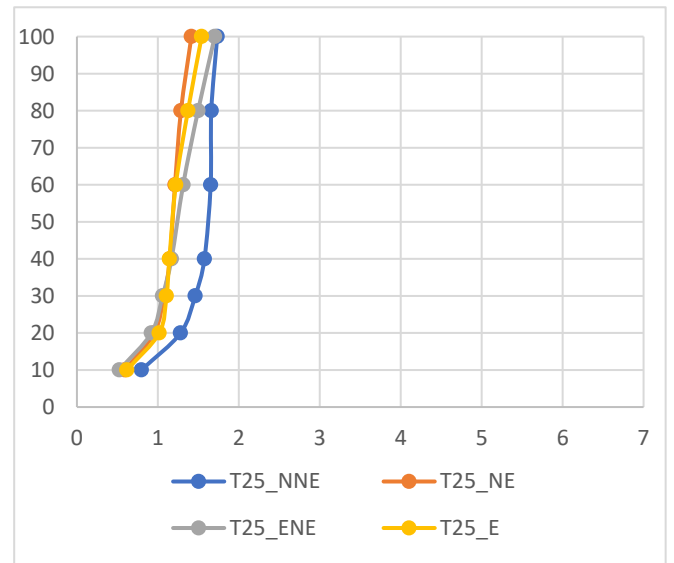
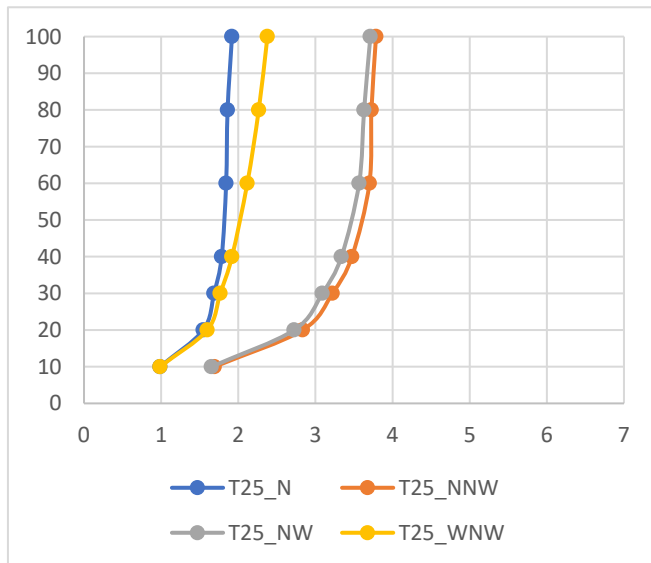
Zephir 111 – Período Diurno



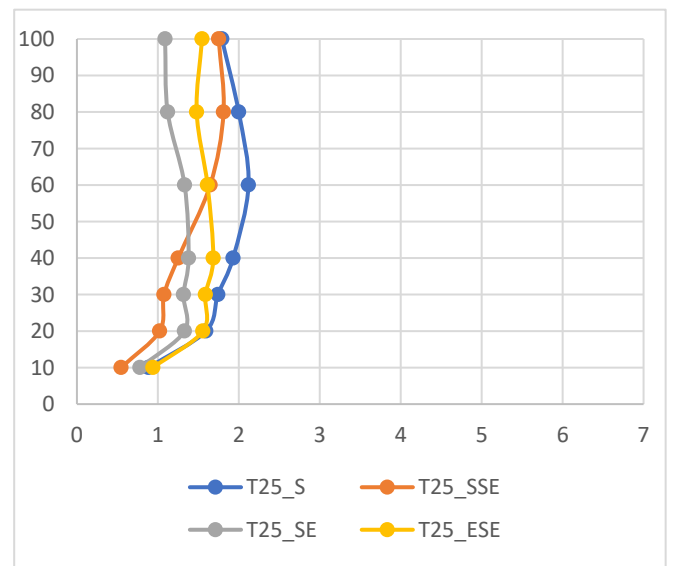
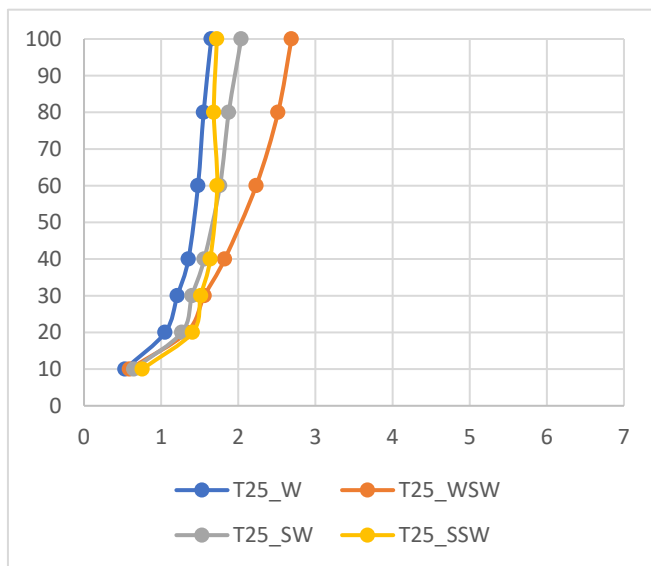
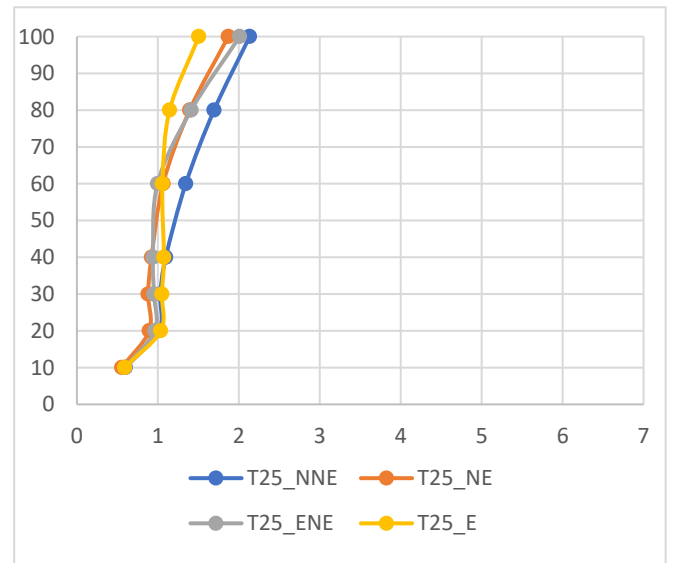
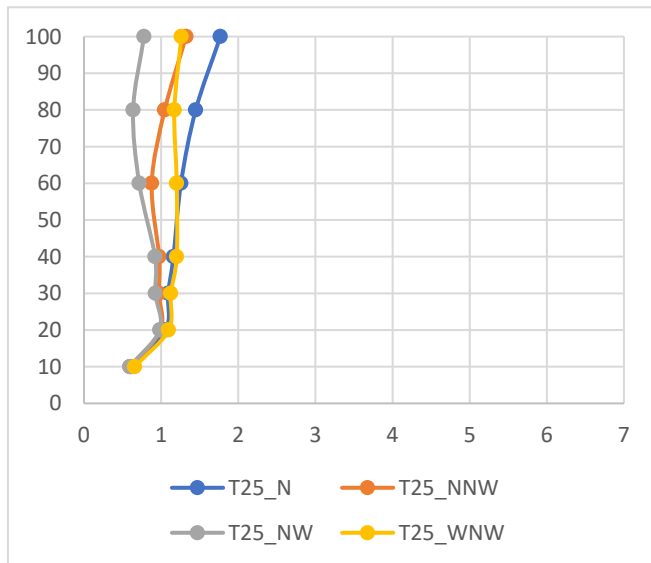
Zephir 111 – Período Noturno



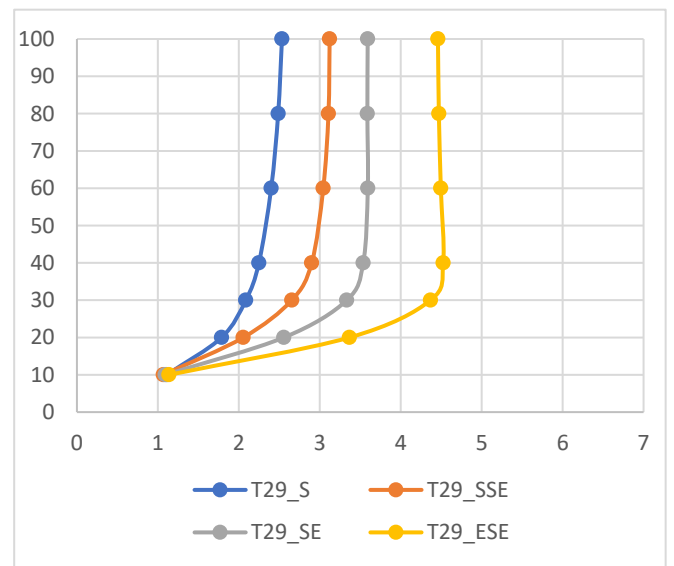
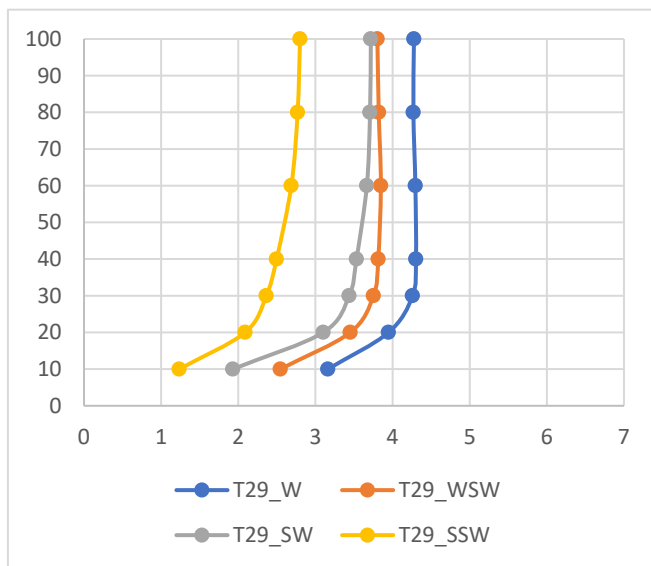
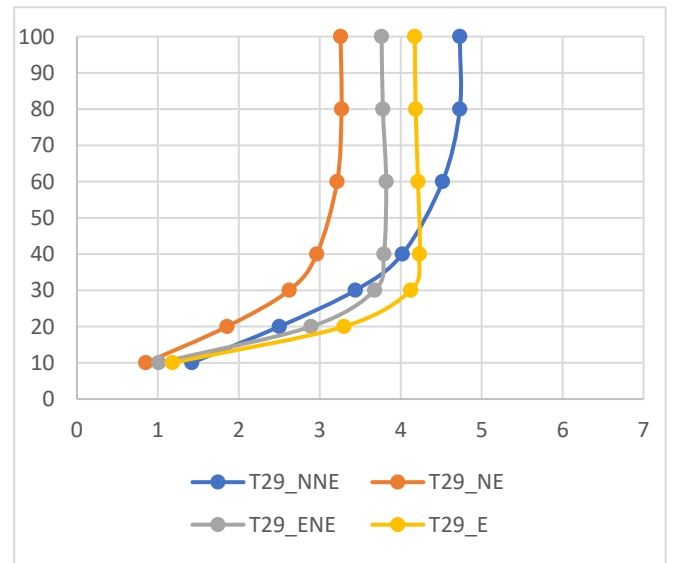
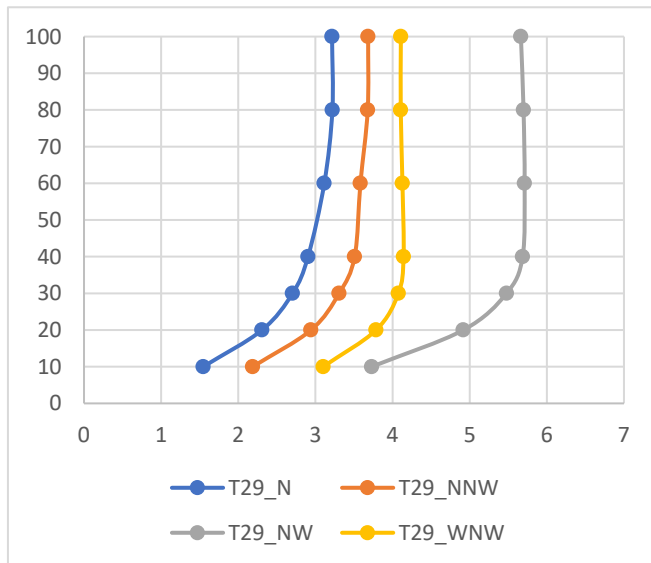
Estação de Medição n.º25 – Período Diurno



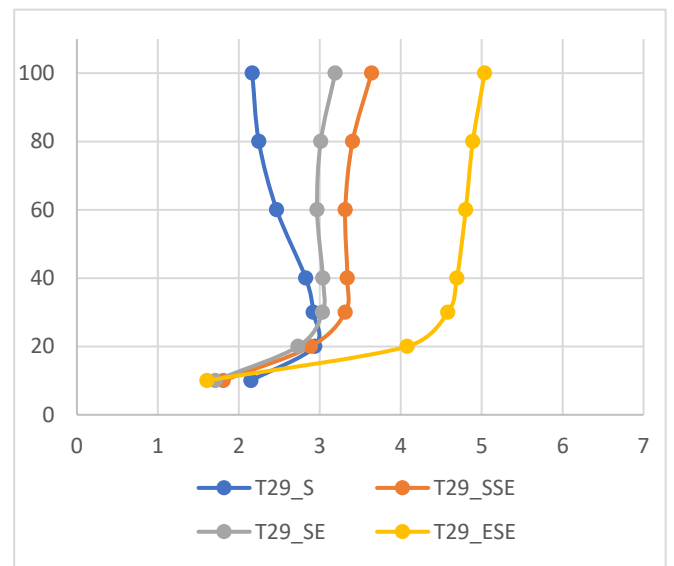
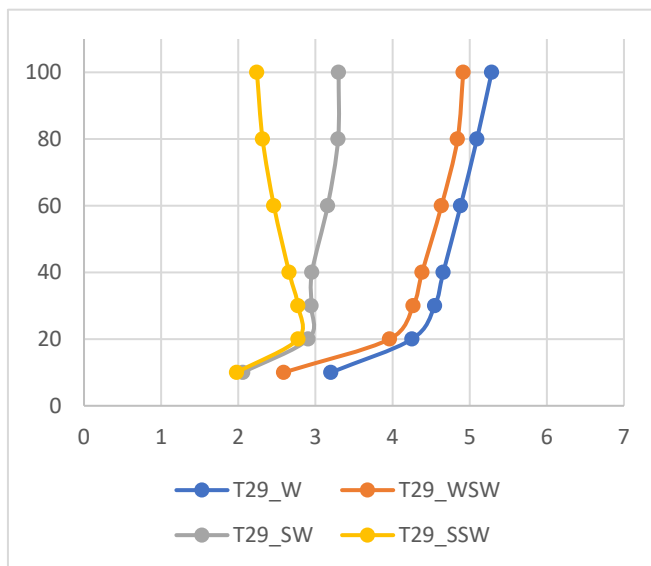
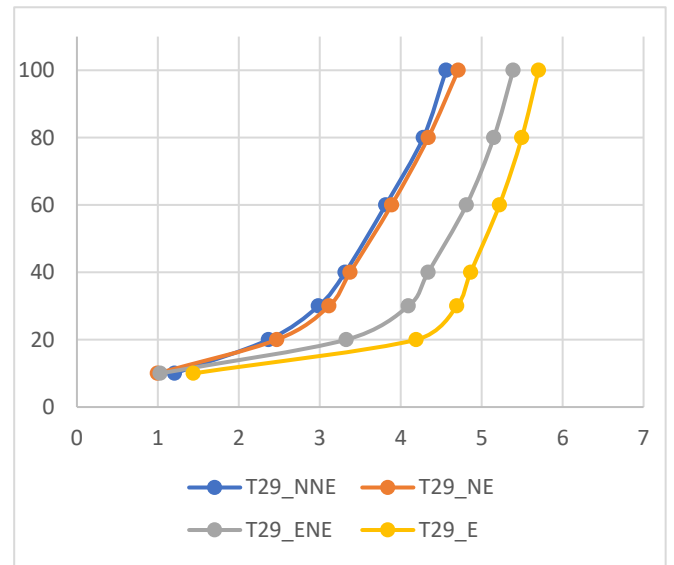
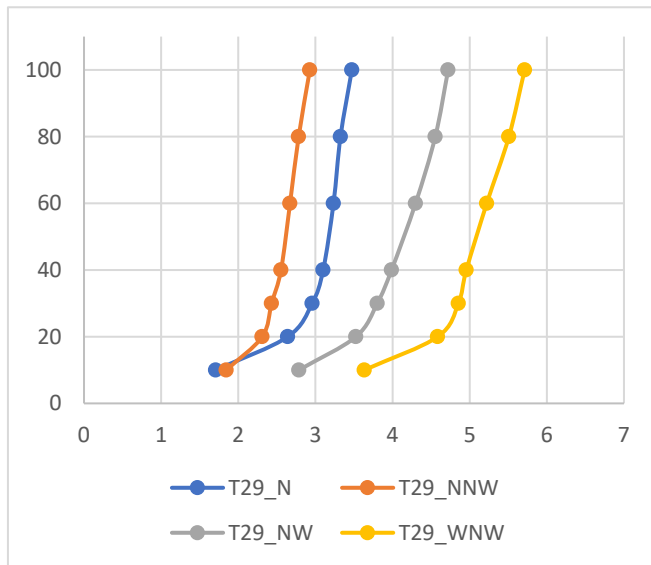
Estação de Medição n.º25 – Período Noturno



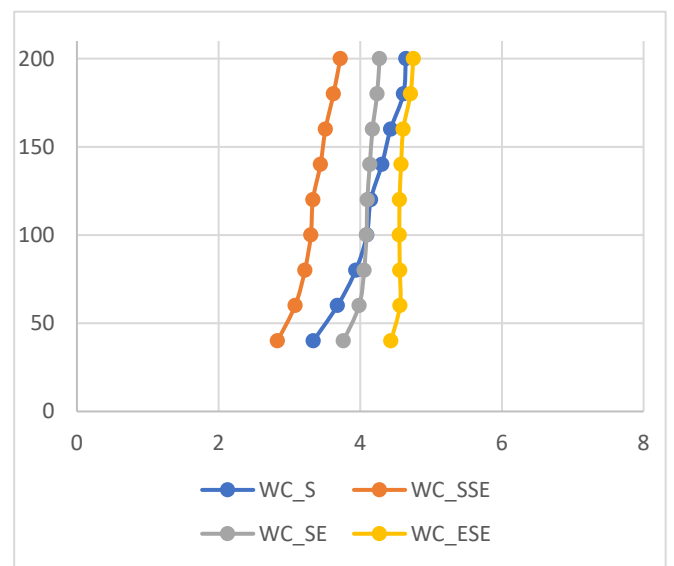
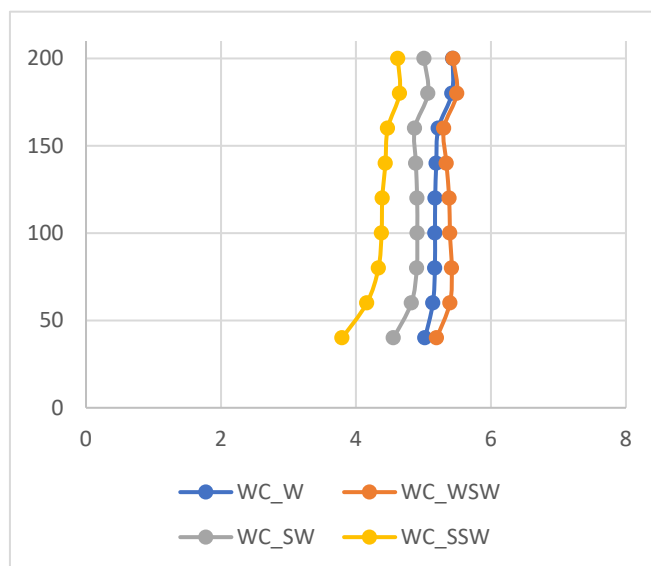
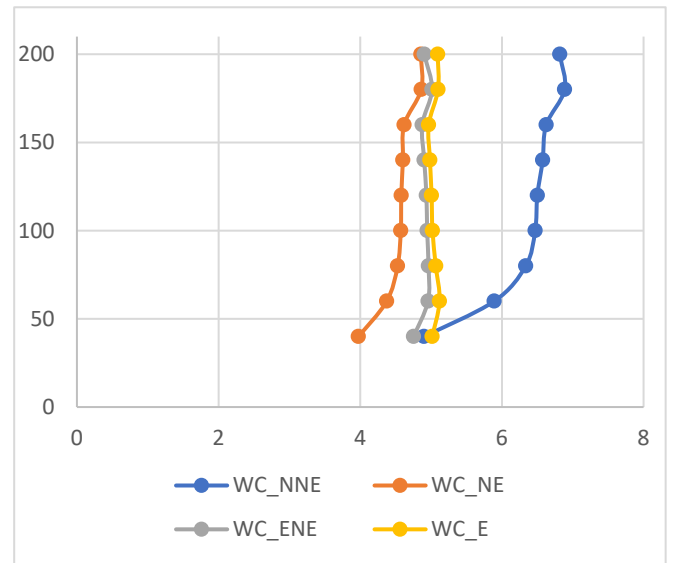
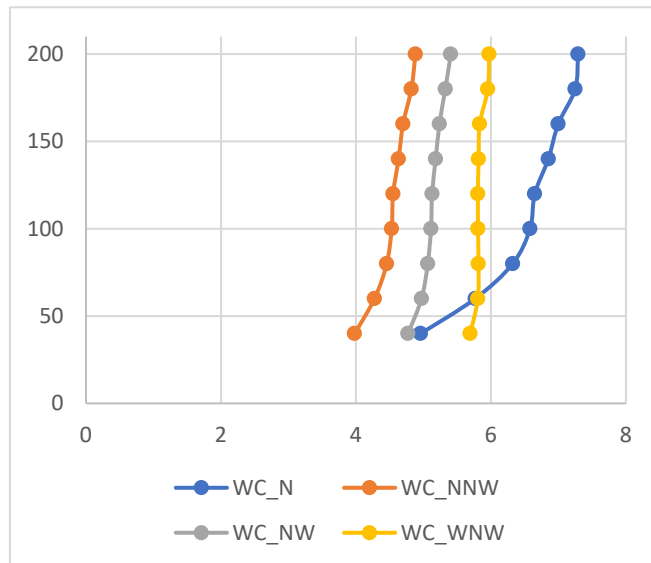
Estação de Medição n.º29 – Período Diurno



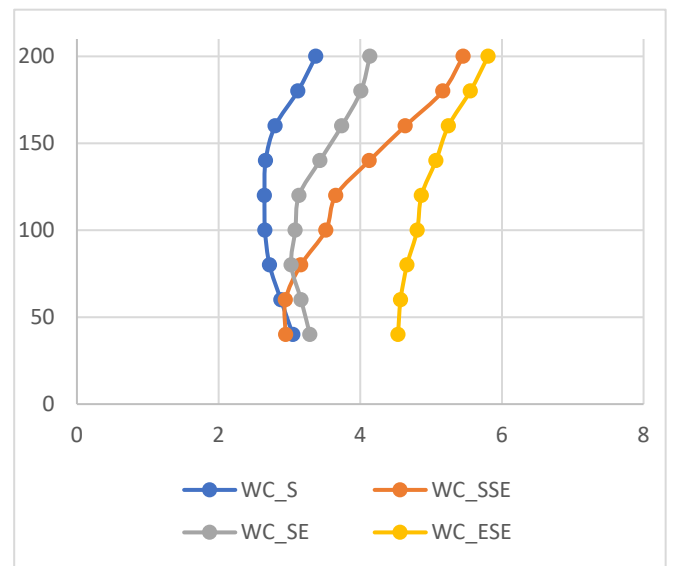
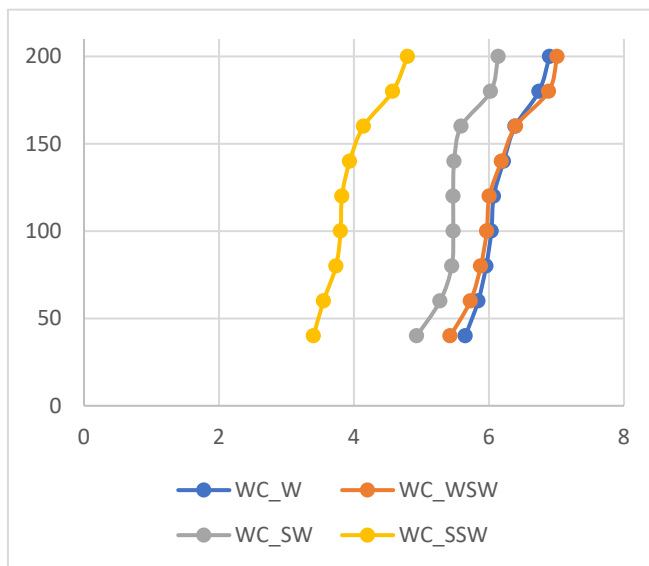
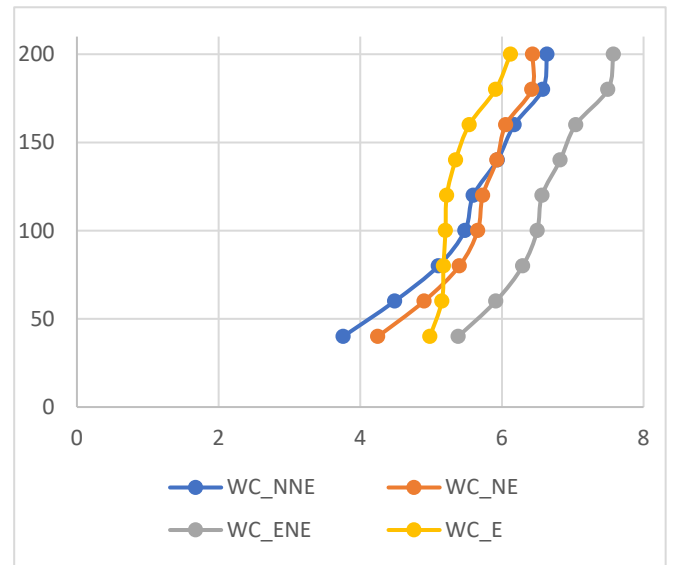
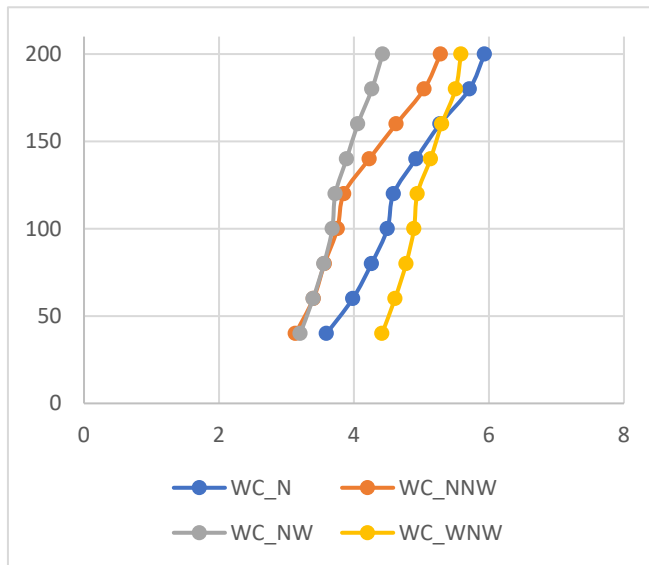
Estação de Medição n.º29 – Período Noturno



LiDAR Windcube® – Período Diurno



LiDAR Windcube® – Período Noturno



ANEXO E: Diferença entre o número de registos antes e após filtragem para os diferentes meses de medição

Período Disp. Med.	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro
Zephir 112	548	2288	2287	2131	1571	694	172	N.A.	N.A.
Estação de Medição 20	N.A.	N.A.	3326	1726	663	1263	330	387	1853
Zephir 111	1096	3574	2548	3523	3269	3081	207	N.A.	N.A.
Estação de Medição 25	22	472	1460	638	207	1428	189	39	18
Estação de Medição 29	205	1119	734	472	356	251	180	89	25
Windcube	N.A.	N.A.	30	627	687	840	1714	622	N.A.